الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الجزائر 02
معهد الآثــار

رسالة لنيل شهادة دكتوراه في الصيانة والترميم بعنوان:

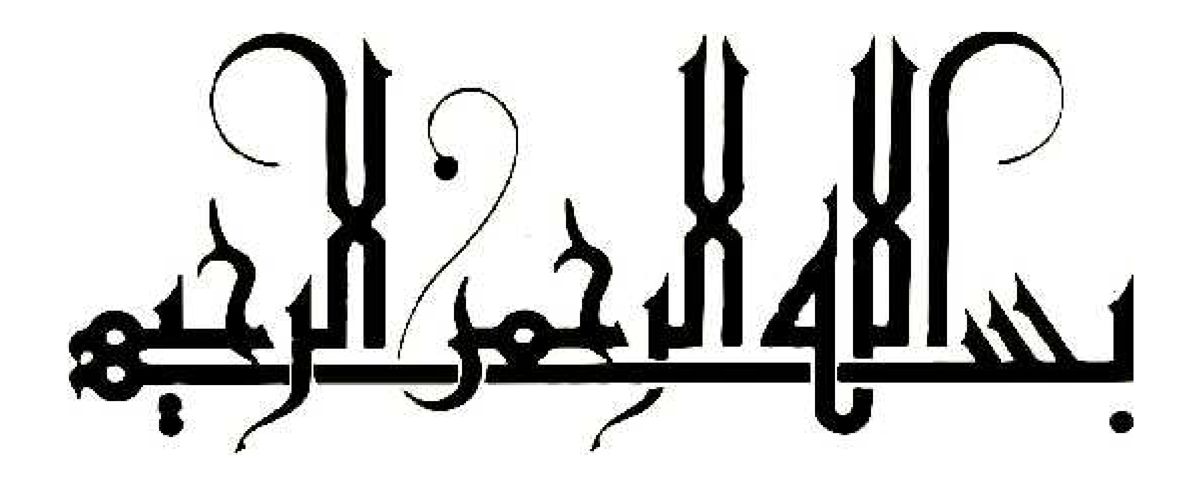
دراسة فعالية تقوية الحجارة الأثرية

دراسة تطبيقية على عينات من الحجارة الرملية

إعداد الطالب:
بلعيبود بدرالدين

تحت إشراف:
د/ محمد المصطفى فيلاح

السنة الجامعية 2014/2013


بسم الله الرحمن الرحيم

« … Lorsque vous pouvez mesurer ce dont vous parlez et l'exprimer en chiffres, vous en connaissez quelque chose; mais lorsque vous ne pouvez l'exprimer en chiffres, votre connaissance en est superficielle et insatisfaisante; ce peut être le début de la connaissance, mais vos idées ont à peine atteint l'état de science, quel qu'en soit le sujet. »

Lord Kelvin

أهـدي هذا العمــل إلـى

أمي وأبي

قائمة المختصرات

MEB : Microscope elecrronique à balayage

TEOS : Orthosilicate de tétraéthyle

P : عينة من الحجارة الرملية المعالجة بمادة البارالويد ب 72

E : عينة من الحجارة الرملية المعالجة بمادة اوروستاك أ.س.أس 2001

T : عينة من الحجارة الرملية بدون معالجة (عينة شاهد)

المقدمة

مقدمـة:

تتعرض الحجارة الأثرية للعديد من أنواع التلف، ويعتبر فقدان تماسك عناصرها الفلزية من أهم الأسباب التي تؤدي إلى ضياع المادة الأصلية وضياع معطيات أثرية وفنية من سطح الحجارة الأثرية خاصة التي تحمل كتابات أو نقوشا أو رسوم، في وقت ليس ببعيد كانت الحجارة المتلفة والفاقدة لبعض خصائصها تُستبدل بأخرى لها مميزات قريبة من الحجارة المزاحة، لكن في العشريات الأخيرة ظهرت إرادة قوية للحفاظ على المواد الأثرية الأصلية، ولهذا الغرض طبقت العديد من تقنيات ومواد لتقوية الحجارة.

إن الحفاظ على الحجارة الأصلية الفاقدة لتماسكها يستدعي تدخلا لإعادة ربط عناصرها وهذا ما يعرف بالتقوية، وتعتمد هذه العملية على إدخال مادة مقوية في نسيج الأجزاء المتلفة للحجارة لتؤدي دور الملاط الذي يقوم بربط العناصر الفلزية فيما بينها، ويستعمل لهذا الغرض العديد من مواد التقوية الموجوة في السوق، إلا أن أغلبها لديها سلبيات تجعل منها غير فعّالة، ويعتبر التغلغل الضعيف وغير المتجانس من بين أهم السلبيات، يرتبط التغلغل بعدة عوامل منها نوع وطبيعة الحجارة المعالجة وبطبيعة المادة المقوية وطريقة تطبيقها وفي بعض الأحيان ترتبط العملية بعوامل مرتبط بالنوع التلف ودرجته وانتشاره.

من بين الأسباب الرئيسة التي أدت بنا إلى إختيار موضوع البحث هو الإنتشار الواسع لهذا النوع من تلف الحجارة بمختلف أنواعها، فعند التجوّل في المواقع الأثرية نلاحظ إنتشار ظاهرة تفتت الحجارة وفقدان تماسكها بدرجات متفاوتة، فبالرغم من إختلاف مسببات هذه الظاهرة (الأملاح والجليد والكائنات الحية...) إلا أن نتائج هذا التأثير ومظهره تكاد تكون واحدة وهي فقدان المادة الأثرية ففي بعض الحالات لاحظنا ضياع عدة سنتيمترات من سطح الحجارة، ما دفعنا في البحث عن أساليب ومواد تكون فعّالة لإيقاف ضياع العناصر الفلزية للحجارة وذلك من خلال إعادة تماسكها بتطبيق مقويات تضمن إلتحام العناصر المفككة.

تمّ إختيار عينات الدراسة من موقع شالة الأثري بالرباط في إطار منحة طويلة المدى إلى المملكة المغربية الشقيقة، وقد تم إختيار هذا الموقع بسبب إنتشار ظاهرة فقدان التماسك الذي مسّ مساحة معتبرة من الحجارة الرملية التي تشكل أغلبية المنشآت الأثرية التي تعود الى الفترة القديمة، كما يعتبر هذا النوع من التلف الأكثر تهديدا للمادة الحجرية ما يستدعي تدخلات إستعجالية لوقف فقدان المادة الأصلية.

تتمحور الإشكالية الرئيسة للبحث حول مدى فعالية مواد التقوية، واخترنا في هذا البحث دراسة فعالية مادتين مقويتين (البارالويد B72 وأوروستاك ACS 2001) المطبقة على عينات من الحجارة الرملية المأخوذة من الموقع الأثري لشالة، والهدف - من هذه الإختبارات هو تحديد نجاعة العلاج المطبق وإعتمدنا في هذه الدراسة على مجموعة من المعايير هي:

- قابلية تبلل السطح بفعل خاصية عزل الرطوبة للمادة
- الخصائص الميكانيكية للحجارة
- لون الحجارة المعالجة
- الهندسة المسامية للحجارة

بعد تطبيق المادتان المقويتان على العينات الحجرية يمكن تحديد نسبي لفعالية كلا المادتين وذلك من خلال مقارنة معايير الفعالية المذكورة.

من بين أهم الصعوبات التي واجهناها أثناء إنجازنا لهذا البحث هي قلة الأبحاث والمراجع باللغة العربية في موضوع تقوية الحجارة الأثرية، بالإضافة إلى إشكالية ترجمة المصطلحات العلمية إلى اللغة العربية خاصة المفردات الخاصة بمظاهر تلف الحجارة وأيضا المصطلحات الخاصة بالتفاعلات والمواد الكيميائية، لذا إرتاينا عند إستعمال مصطلح من هذا النوع لأول مرة في النص أن نردفه بترجة باللغة الفرنسية لتقريب الفهم للقارئ كما حاولنا قدر الإمكان تفادي الترجمة الحرفية للمصطلح، فبالرغم من بعض المحاولات في تعريب المصطلحات الخاصة بمجال الصيانة والترميم على غرار ما نشره المركز الدولي لصيانة وترميم الممتلكات الثقافية

(ICCROM) في إطار برنامج "آثار" تحت عنوان: "معجم المصطلحات العربية للحفاظ على التراث الثقافي" إلا أن هذه المحاولات تبقى عامة ولا تخدم الأبحاث العلمية الدقيقة باللغة العربية.

ومن بين الصعوبات أيضا عدم تمكننا من إقتناء بعض مواد التقوية التي كانت مبرمجة لتطبيقها على عينات الدراسة، منها سيليكات الإيثيل (Silicates d'éthyle) وألكوكسي سيلان (Alkoxysilanes) الذي أنتشر إستعمالها في السنوات الأخيرة خاصة في تقوية الحجارة الرملية، واعتبرها الباحثين من بين المقويات التي تتميّز بفعالية عالية، أما فيما يخص التحاليل فبالرغم من قيامنا بالتحليل البيتروغرافي وإختبارات خاصة بتحديد قابلية التبلّل والنفاذية لعينات الدراسة، إلا أننا لم نتمكن من إستعمال وسائل تحليل ذات تكنولوجيا عالية مثل تقنية الرنين المغناطيسي النووي (RMN) والتصوير المقطعي باستعمال الأشعة السينية (Tomographie à rayons X) حيث تمكّننا هذه التحاليل من تحديد دقيق لإنتشار المادة المقوية في الشبكة المسامية للعينة.

إعتمدنا في إعداد هذا البحث على مجموعة من الدراسات لباحثين في مجال صيانة الحجارة من أهمهم: الإيطاليين Lazareni (L), Toracca (G) والبولندي Domasloswski (W) والفرنسي Bromblet (P)، ومن أهم الأبحاث التي اعتمدنا عليها في هذا البحث:

Torraca (G), *Lectures on materials Science for architectural conservation*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles 2009

Torraca (G), *Matériaux de construction poreux*, traduit par Di Matteo (C), ICCROM, Rome 1986

Domasloswski (W), *Conservation préventive de la pierre*, traduit par Woszyck (I), UNESCO, Paris 1982

Lazzarini(L) & Tabasso (L), *Il restauro della pietra*, CEDAM, Milani 1985

كما حاولنا الإطلاع على الأبحاث والدراسات الحديثة التي أجريت حول تقوية الحجارة، وخاصة منها التي طبقت فيها مواد جديدة للتقوية أو التي طبقت مناهجا وطرقا حديثة، ومن بين أهم هذه الدراسات:

Doehne (E) & Clifford (A), *Stone Conservatio: An Overview of Current Research*, The Getty Conservation Institute, Second Edition, Los Angeles 2010

Casadio (F) & Toniolo (L), *«Polymer treatments for stone conservation: methods for evaluating penetration depth»*, in JAIC 43 (2004)

Ferreira Pinto (A.P) & Rodrigues (J), *Stone consolidation: The role of treatment procedures,* in Journal of Cultural Heritage n°9, 2008

Wheeler (G), Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone, The Getty Conservation Institute, Los Angeles 2005

من الناحية المنهجية تم تقسيم البحث إلى جانبين: نظري وتطبيقي، ففي الجانب الأول عرضنا فيه مختلف مظاهر التلف المشاهدة على سطح الحجارة الفاقدة لتماسكها وشرحنا الآليات التي تؤدي لهذا النوع من التلف من خلال تحديد العوامل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تؤدي إلى إضعاف إلتحام الحجارة، وركّزنا في هذا المحور على بعض العوامل التي تلعب دورا رئيسا في فقدان تماسك الحجارة كالأملاح والجليد وبعض الكائنات الحية، وحاولنا تفسير التلف من خلال آلياته على المستوى المجهري واستعنا بصور مجهرية -خاصة صورالمجهر الإلكتروني الماسح MEB- لتفسير مختلف مظاهر التلف، كما تطرقنا إلى عملية تقوية الحجارة الأثرية بدءا بتاريخ إستعمال المقويات ثم عرضنا أهم المقويات الجديدة والمعدّلة مع ذكر خصائصها وفعالياتها، كما عرضنا أهم مناهج وأساليب التي تطبق من خلالها المواد المقوية.

أما الجانب التطبيقي فقمنا من خلاله بعرض الإختبارات والتجارب التي قمنا بها، حيث قمنا بتطبيق مادتين مقويتين (البارالويد B72 وأوروستاك ACS 2001) على عينات الدراسة المشكلة من الحجارة الرملية التي أخذت من الموقع الأثري لشالة، فمن خلال هذه الإختبارات حاولنا تحليل مختلف النتائج على ضوء معطيات نظرية التي تطرقنا إليها في الجانب النظري، وحاولنا تقييم العلاج المطبّق على العينات الحجرية من خلال مقارنة بعض المعايير التي إعتمدناها هذا البحث وهي:

- التغيّر في لون الحجارة بعد تطبيق العلاج
- دراسة قابلية التبلل (Mouillabilité) العينات المعالجة
- التغيّر في الهندسة المسامية من خلال مقارنة نفاذية العينات قبل وبعد العلاج
- مقارنة بعض الخصائص الميكانيكة للعينات قبل وبعد العلاج

نظرا للمنهجية المتّبعة في هذا البحث قمنا بتقسيمه إلى ثلاثة فصول ففي الفصل الأول تناولنا فيه مختلف أنواع التلف الذي يؤدي إلى فقدان تماسك الحجارة الأثرية، حيث تطرقنا إلى أهم المظاهر التي تنتج عن تفكك العناصر الفلزية للحجارة كالتفتت الحبيبي وانفصال الطبقات والشقوق والثقوب الدقيقة وعرضنا صورا لكل هذه المظاهر، العنصر الثاني لهذا الفصل خصصناه إلى عوامل التلف المؤدية لمختلف المظاهر المذكورة وقد إتخذنا الآلية كمعيار في تقسيم التلف التي تؤدي إلى فقدان التماسك، فأدرجنا عوامل التلف ضمن آليتن فيزيائية و/أو كيميائية، وحاولنا تفسير مختلف التفاعلات التي تضعف إلتحام العناصر الفلزية للحجارة فيما بينها ووضعنا خصيصا صورا مجهرية تأكيدا منا على أن كل ما يشاهد على مستوى سطح المادة الأثرية عموما وعلى الحجارة الأثرية خصوصا من مظاهر التلف ما هو في الحقيقة إلا تفاعلات تحدث على المستوى البنيوي المجهري للمادة نتيجة تغيرات في الخصائص الكيمائية أو الفيزيائية أو الميكانيكية للحجارة.

أما الفصل الثاني تناولنا فيه كل ما يخص عملية تقوية الحجارة الأثرية، فكان من الضروري إعطاء لمحة تاريخية للعملية وعرض المقويات التي طبقت مع ذكر أهم الباحثين الذين ساهموا في هذا المجال، ثم عرضنا مختلف المواد الكيميائية المستعملة في مجال التقوية، سواءا منها الفلزية ككربونات الكالسيوم والباريوم أو العضوية والتي في مجملها راتنجات إصطناعية بالإضافة إلى موادا مشكلة من عنصر السيليسيوم (Si)، وحاولنا إبراز خصائص هذه المقويات إعتمادا على العديد من الدراسات والإختبارات المخبرية والميدانية، وفيما يخص تقييم العلاج إعتمدنا على عدة معايير مخبرية يمكن من خلالها تحديد فعالية التدخل من عدمه، ويعتبرالتغلغل الجيد والمتجانس أهم هذه المعايير بالإضافة إلى عومل أخرى تؤخذ بعين الإعتبار كالتغيّر في اللون وتحسين الخصائص الميكانيكية للحجارة المعالجة.

في الفصل الأخير عرضنا فيه الاختبارات والتجارب التي قمنا بها على عينات الدراسة، وأجرينا مقارنة لفعالية مادتين مقويتين هما (البارالويد B72 وأوروستاك ACS 2001) الأول عبارة عن راتنج أكريليكي والثاني هي مادة مشكلة أساسا من إرتباط تكافئي بين عنصر (Si) وعنصر (C)، طبقت هاتين المادتين على عينات من الحجارة الرملية المأخوذة من موقع الأثري لشالة الذي يعود للفترة القديمة، فقبل تطبيق العلاج قمنا بدراسة بيتروغرافية على هذه الحجارة فقمنا تحضير فشرات رقيقة ودراستها تحت المجهر القاطب، وتم ذلك بمخبر علوم الأرض والجيوليوجيا بكلية العلوم بجامعة مكناس، بعدها طبقنا المقويين على العينات عبر طريقة الغمر، وبعد هذه العملية إختبرنا العينات فيما يخص قابلية تبلّل سطح العينات ومقارنة نفاذيتها للسوائل وكذا مراقبة تغيّر لون الحجارة المشكلة للعينات، وإنطلاقا من هذه الملاحظات والتسجيلات قمنا بتقييم المادتين المقويتين ومدى فعاليتهما على العينات.

وفي نهاية البحث وضعنا خاتمة فيها أهم العوامل التي تحدد عملية التقوية، وكذا أهم المعايير التي تؤخذ بعين الإعتبار في تقييم العلاج، وعرضنا أيضا النتائج التي تحصلنا عليها بعد تطبيق مادتي التقوية (البارالويد B72 وأوروستاك ACS 2001) على

عينات الدراسة، لم نعتمد هذا البحث على وسائل ذات تكنولوجية عالية في تقييم الإختبارات التي قمنا بها بسبب عدم توفرها، بالإضافة أن الهدف الرئيس من وراء هذا العمل هو وضع منهج دراسة فيما يخص تقوية الحجارة الأثرية والإعتماد على وسائل متاحة على الأقل لتقييم أولي ونسبي لأي عملية تقوية.

الفصل الأول: فقدان تماسك الحجارة الأثرية

I- مظاهر فقدان التماسك

II- آليات فقدان التماسك

I- مظاهر فقدان تماسك الحجارة الأثرية:

نقصد بمظهر التلف هو ذلك التغيّر الذي تحدثه مختلف العوامل والذي يظهر على سطح المادة الأثرية، سواءا كالتغيرات في الشكل أو في اللون أو في نسيج المادة أو في إستمرارية السطح، وكل هذه المظاهر ما هي إلا نواتج لتفاعلات فيزيائية و/أو كيميائية أدت إلى تغيير في بعض خصائص المادة ما يترجم تغير في مظهرها.

تختلف أشكال ومظاهر تلف الحجارة بحسب أنواعها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية، وترتبط التغيرات التي تطرأ على الحجارة بطبيعة عوامل التلف ودرجة ومدة تأثيرها، هناك عدة أنواع من تلف الحجارة الأثرية، في هذا البحث نتناول فقط الأنواع التي تؤدي إلى فقدان تماسك العناصر الفلزية المشكلة للحجارة، وفيما يلي نذكر أهم مظاهر هذا النوع من التلف الذي يمكن مشاهدته على سطح الحجارة :

1-I الشقوق الدقيقة:

يمكن تعريف الشقوق على أنها إنقطاع (Rupture) في سطح المادة بسبب فقدان في بعض الخصائص الميكانيكية، هذا ما يخلق عدم توان في إستمرارية السطح ما يجعله عرضة لعدة تفاعلات قد تؤدي به إلى التلف، تنشأ الشقوق على سطح المادة الحجرية لعدة أسباب، من أهمها عوامل متعلقة بخصائص الحجارة في حد ذاتها، حيث تنشئ الشقوق على طول المستويات الهشة والضعيفة ومثال على ذلك الشقوق الأفقية التي تظهر على الصخور الغضارية وأنواع أخرى من الصخور الرسوبية، كما تتسبب عوامل خارجية كالأملاح والجليد والحرارة في ظهور شقوق على سطح الحجارة (الصورة رقم: 1، 2)، إن الشقوق التي تستدعي تدخلا في إطار عملية التقوية هي التي لا يتعدى عرضها 1 ملم[1]، بينما الشقوق التي تتعدى هذه الأبعاد فتتطلب نوع آخر من التدخل وهي عملية التمليط (stucage).

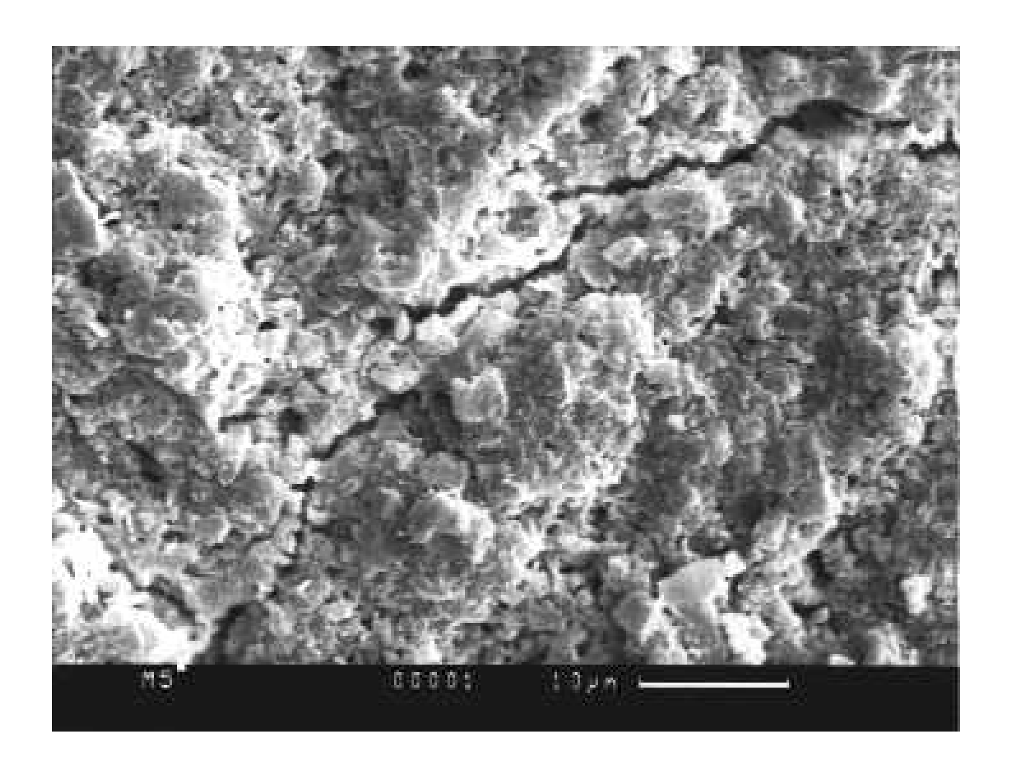
---

[1] Vergès-Belmin (V) & Al, *Glossaire illustré sur les formes d’altération de la pierre*, ICOMOS, Ateliers 30 Impression, Champigny/Marne, France 2008, p.10



الصورة رقم 1: صورة مكبرة لشقوق دقيقة على سطح حجارة كلسية

(Angeli (M) 2007)



الصورة رقم 2: صورة مجهرية (MEB) لشق دقيق لعينة من حجارة طابشيرية نتيجة تبلور الأملاح في المسامات

(Nicholson (T) 2000)

I-2 ظاهرة الإنفصال:

تؤدي بعض الظواهر -خاصة الفيزيائية منها- إلى إنفصال أجزاء من سطح الحجارة الأثرية، ويختلف شكل ودرجة الإنفصال بحسب نوع الحجارة وخصائصها إلى جانب آليات التلف المؤثرة، وهناك عدة أنواع من إنفصال طبقات رقيقة وقشور من السطح وهي:

I-2-1 الإنتفاخ:

في بعض الحالات تنفصل طبقات رقيقة من سطح الحجارة على شكل إنتفاخ نصف كروي أجوف (Boursouflure)[1]، وفي كثير من الأحيان تكون الأملاح القابلة للذوبان مسئولة عن هذا النوع من المظاهر، وغالبا ما تكون الإنتفاخات الجوفاء على سطح الحجارة الرملية. (الصورة رقم: 3، 4)



الصورة رقم 3: صورة مكبّرة لإنفصال طبقة رقيقة على شكل إنتفاخ نصف كروي أجوف على سطح حجارة رملية

(Vergès-Belmin (V) et Al 2008)

[1] Vergès-Belmin (V) & Al, Op.Cit., p.14



الصورة رقم 4: إنفصال طبقة رقيقة على شكل إنتفاخ نصف كروي أجوف على سطح تمثال من الحجارة الكلسية
(Vergès-Belmin (V) et Al 2008)

I-2-2 الإنفصل المتوازي:

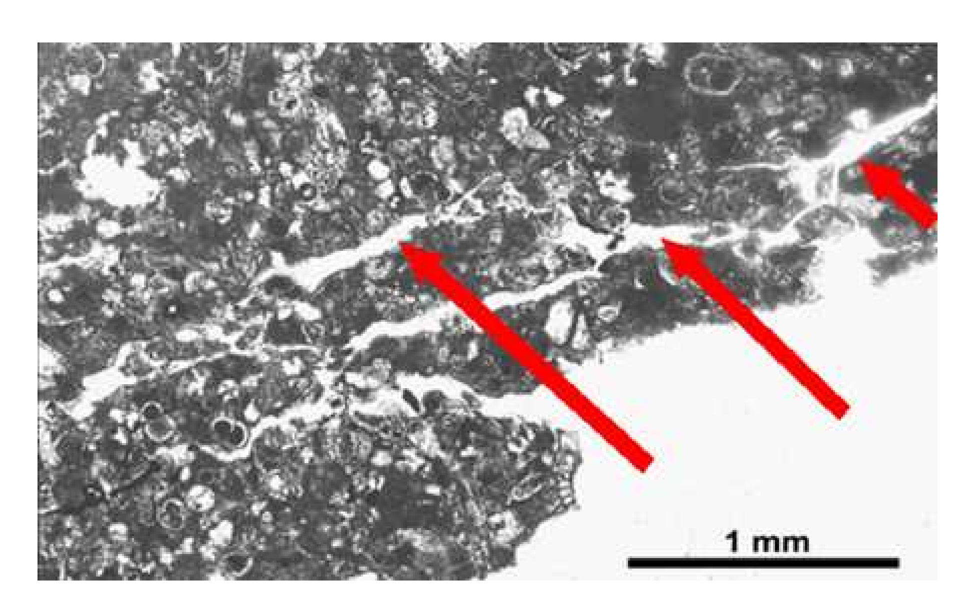
تتمثل هذه الظاهرة في إنفصال قشور رقيقة (Desquamation) من سطح الحجارة (الصورة رقم:5)، فبالرغم من السمك الرفيع لهذه القشور الذي عادة لا يتعدى مليمتر واحد[1] (الصورة رقم:6) فإن خطورة هذا النوع من التلف تكمن في المساحة الواسعة التي يصيبها التلف، كما تكمن الخطورة أيضا في حالة ما إذا كان السطح يحمل معطيات أثرية أو فنية كرسومات أو كتابات، كما أنه في بعض الحالات يفوق سمك القشرة السنتيمتر الواحد ما يؤدي إلى فقدان معتبر في المادة الأصلية.

[1] Ezzdine (R), *Endommagement des monuments historiques en maçonnerie*, thèse pour obtenir le grade de docteur spécialité : Mecanique, Université Bordeaux 1, Soutenue en 2007, p.16

هذه الظاهرة عادة ما تكون منتشرة على سطح الحجارة الكلسية المستعملة في البناء، ويمكن ملاحظة هذا المظهر في أغلب المواقع الأثرية، كما تتعرض الرسومات الصخرية في الصحراء لإنفصال في الطبقة الخارجية ما يؤدي في كثير من الحالات إلى ضياع أجزاء هامة من هذه الرسومات.



الصورة رقم 5: إنفصال لطبقة رقيقة من حجارة كلسية موقع خميسة بسوق أهراس



الصورة رقم 6: صورة مجهرية لمقطع عرضي لعينة من سطح حجارة كلسية متلفة تمثل شقوق متوازية دقيقة (موضع السهم) مسئولة عن ظاهرة الإنفصال الطبقي

بالتصرف (Varas (M.J) 2008)

3-I ظاهرة التفتّت:

إن التفتّت عبارة عن إنفصال وتفكك لعناصر فلزية مشكلة للحجارة، يكون تأثير هذه الظاهرة على الطبقات الخارجية وفي كثير من الحالات يتعداه ليصل الى عمق الحجارة، يعرف هذا النوع من التلف بالتفتّت الحبيبي (Désagrégation Granulaire) عندما يتعلق الأمر بالحجارة ذات البنية الحبيبية الكبيرة كالحجارة الرملية والرخام، عادة ما ينتج عنه ترسّب لحبيبات المادة أسفل الحجارة المتلفة (الصورة رقم: 7)، يمكن تقسيم ظاهرة التفتّت إلى ثلاثة أنواع[1]:

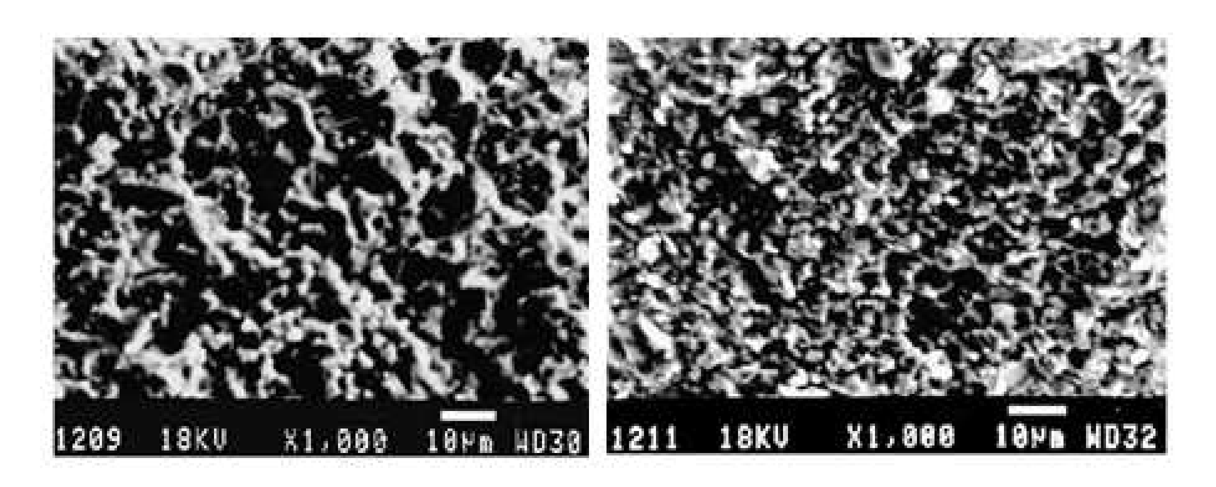
- التفتّت الرملي (Désagrégation Sableuse) وهو إنفصال لحبيبات الرمل المشكّلة لسطح الحجارة الرملية وذلك بسبب فقدان الرابط (سيليسي أو كلسي) لخصائصه ما يؤدي إلى إنفصال حبات الرمل من سطح الحجارة. (الصورة رقم: 8، 9)



الصورة رقم 7: تفتّت حبيبي لحجارة رملية

(Vergès-Belmin (V) et Al 2008)

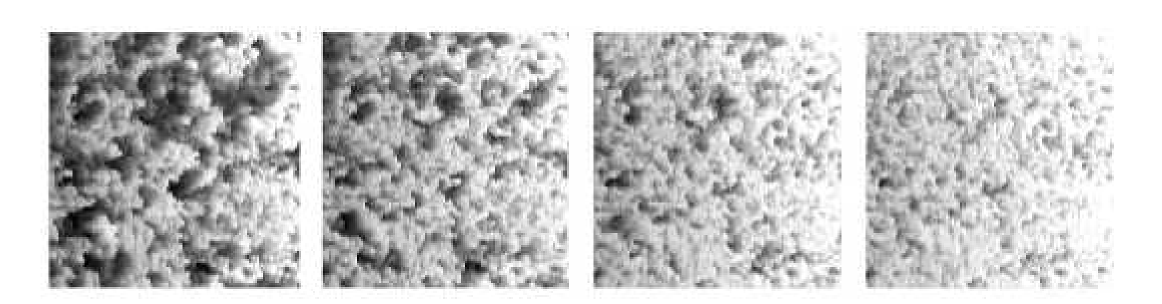
[1] Ezzine (R), Op.Cit., p.17



الصورة رقم 8: صورة مجهرية (MEB) لحجارة رملية قبل وبعد التفتّت الحبيبي

(يمين: قبل التلف/ يسار: بعد التلف)

(Tugrul (A) 2004)

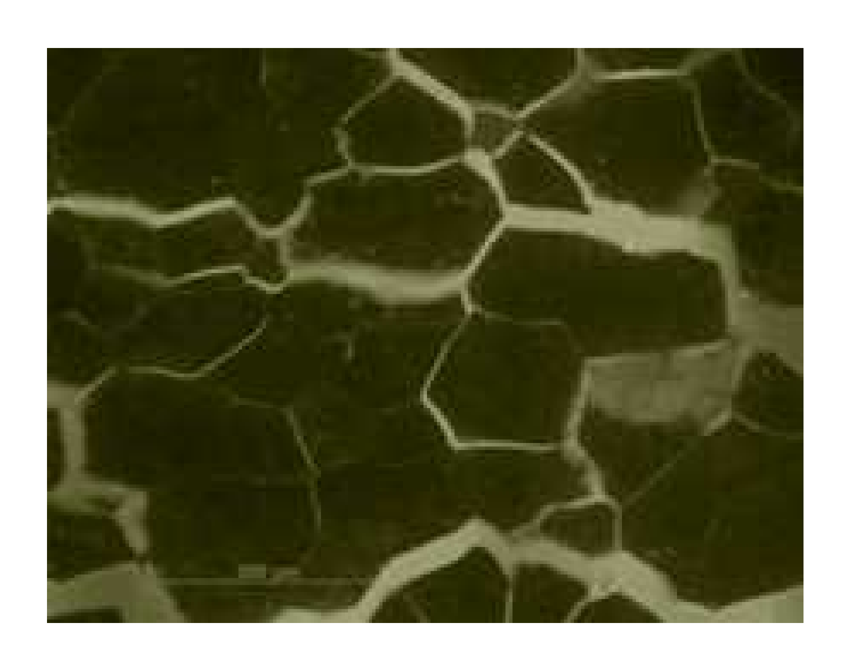


الصورة رقم 9: صور مكبرة لمراحل التفتّت الحبيبي لحجارة رملية

(من اليمين الى اليسار)

(Birginie (G.M) 2004)

- التفتت على شكل مسحوق (Pulvérulence) ينتج عن هذا النوع من التلف فقدان للمادة الحجرية على شكل مسحوق، هذا التلف خاص بالحجارة التي تتشكل من عناصر ذات حبيبية دقيقة.
- التفتّت السكري (Désagrégation Saccharoïde) هذا النوع من التلف يمس الرخام ذو بلورات كبيرة، ففي بعض الحالات يصل عمق التفتّت إلى عدة سنتيمترات وتعتبر التغيّرات في درجة الحرارة عاملا رئيسا في هذا النوع من التلف. (الصورة رقم: 10)



الصورة رقم 10: شفرة رقيقة لعينة من الرخام مصاب بتفتّت سكري معرضّة لإضاءة وهّاجة **(**Fluorescente**)** -تفكّك بلورات الكالسيت-
(Karatasios (I) & al 2009)

4-I الذوبان:

تتعرض الحجارة إلى عدة عوامل تؤدي إلى فقدان في مادتها وضياع عناصرها الفلزية، فعكس ظاهرة التفتّت الذي يكون على شكل إنفصال جزيئات صلبة ذات أبعاد متفاوتة بحسب نسيج وبنية الحجارة، فإن ظاهرة الذوبان تؤدي لفقدان في المادة من خلال ذوبان مكونات المادة الحجرية في الماء وبفعل مواد كيميائية خاصة منها الأحماض والأسس، وقد تكون عملية الذوبان إنتقائية أو كلية بحيث تتسبّب فيها عوامل كيميائية وبيولوجية.

تذوب الفلزات المشكلة للحجارة والمادة الرابطة وتختلف كمية المادة المذابة بحسب درجة ذوبانيتها من جهة وشدة تعرّضها للماء أو للمواد الكيميائية التي تفرزها بعض الكائنات الحية التي تتكاثر على سطح الحجارة أو نتيجة تلوث الجو، ففي المواقع الأثرية تتعرض الحجارة المعرضة للأمطار ولمجرى المياه إلى نسبة ذوبان أكبر، وفي بعض الحالات يتعرّض الإسمنت الذي يضمن تماسك عناصر الحجارة للذوبان ما ينتج فقدان في تماسكها و إضعاف إلتحام مكوناتها، ومثال على ذلك الحجارة الرملية ذات الرابط الكلسي.



الصورة رقم 11: ضياع تفاصيل على نحت بارز بسبب ذوبان سطح الحجارة كلسية

(Rollier-Hanselmann (J) 2011)

I-5 ظاهرة الحت:

تؤدي ظاهرة الحت (Erosion) إلى فقدان الطبقة الأصلية للحجارة بسبب آلية ميكانيكية، عادة ما تسبّبها العناصر الصلبة المحمّلة في الرياح بالإضافة إلى الأمطار والبرَد وهذا ما نلاحظه في المواقع الأثرية، ففي كثير من الحالات نجد عناصر معمارية حجرية تضاءلت زواياها وأصبحت حوافها غير حادة، كما يُحدث الحت الإنتقائي تغيّرات وتشوّهات على السطح، وينتج ذلك بسبب فقدان بعض العناصر نتيجة تباين وإختلاف في خصائص العناصر المشكّلة للمادة الحجرية، وتؤدي هذه الظاهرة إلى فقدان في المادة بحسب الآليتين التاليتين:[1]

- فقدان في العناصر الفلزية الأساسية المشكلة للحجارة، ويكون هذا الفقدان إنتقائي بحسب الخصائص الفيزيوميكانيكية لهذه العناصر.
- فقدان في النسيج والمادة الرابطة التي تربط العناصر الأساسية للحجارة فيما بينها، ما يؤدي إلى إنفصال العناصر الفلزية المشكلة للحجارة.

---

[1] Domasloswski (W), *Conservation préventive de la pierre*, traduit par Woszyck (I), UNESCO, Paris 1982, p.41

6-I الثقوب الدقيقة:

يظهر هذا النوع من التلف على شكل ثقوب على سطح الحجارة، بمقاسات وأحجام مختلفة تصل أحيانا لعدة سنتمترات وقد تكون متصلة فيما بينها، وهذه الظاهرة هي نتيجة تلف إنتقائي ناتج عن إختلاف في الخصائص الكيميائية وفيزيائية لمكونات الحجارة، عادة ما تتشكّل ثقوب دقيقة ذات أبعاد مليمترية أو أقل، تأخذ هذه الثقوب الدقيقة (Piting) أشكالا مخروطية أو أسطوانية ولا تكون متصلة فيما بينها، وتتشكل عن طريق تلف إنتقائي جد محدود ناتج عن تفاعل كيميائي أو بيولوجي يصيب عادة الحجارة الكلسية.[1] إن الثقوب الدقيقة التي تقل عن بضعة مليمترات هي معنية بعملية التقوية التي تهدف إلى إيقاف فقدان المادة من خلال ملئ الثقوب الدقيقة بواسطة المادة المقوية.



الصورة رقم 12: ثقوب على سطح حجارة كلسية بفعل عوامل بيولوجية -أشنات-

(Vergès-Belmin (V) 2000)

[1] Vergès-Belmin (V) & Al, Op.Cit., p.40



الصورة رقم 13: صورة مكبرة لثقوب دقيقة لسطح حجارة كلسية بفعل ذوبان إنتقائي (Vergès-Belmin (V) 2000)

II- آليات فقدان تماسك الحجارة :

هناك عدة معايير لتقسيم عوامل ومسببات التلف، فبعض الباحثون يقسمها إلى عوامل داخلية وخارجية والبعض الآخر يقسمها الى طبيعية وبشرية وآخرون يقسمها بحسب طبيعتها ومصدرها إلى فيزيائية وكيميائية وبيوليوجية، نعتمد في هذا البحث معيار الآلية (الميكانيزم) لتقسيم العوامل التي تؤدي لفقدان تماسك العناصر البنيوية المشكلة للحجارة الأثرية، بحيث يحدث التلف بصفة عامة وفق آليتين إثنتين: فيزيائية و/أو كيميائية

II-1 الآلية الفيزيائية :

نقصد بالتلف الناتج عن الآلية الفيزيائية، كل تغيّر في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمادة الأصلية دون تغيير في التركيبة الكيميائية أو الفلزية، وهذا النوع من التلف ناتج عن تأثير قوى وضغط تمارسه بعض العوامل والمؤثرات، ونقتصر في هذا البحث على العوامل التي تؤدي لإضعاف تماسك الحجارة والتي تستدعي تدخلا للتقوية بهدف إعادة تماسكها وهي:

II-1-1 الأملاح القابلة للذوبان:

تعتبر الأملاح من بين أهم العوامل التي تؤدي إلى فقدان تماسك الحجارة، هذه الأملاح عبارة عن عناصر فلزية تتشكّل في العادة على شكل بلورات، ويمكن تمييز نوعين من الأملاح: غير القابلة للذوبان وأخرى قابلة للذوبان، هذه الأخيرة تشكّل خطرا على المادة الأثرية، لأن لها إمكانية الإنتقال داخل الشبكة المسامية على شكل محاليل، وبعد تبخّر الماء بفعل إرتفاع درجة الحرارة تتبلور الأملاح من جديد ويزيد حجمها، مما يخلق ضغطا ميكانيكيا على الجدران الداخلية للمسامات والشقوق الدقيقة.[1]

- مصدر الأملاح:

تختلف مصادر الأملاح التي تتغلغل داخل الحجارة، فهناك ما هو طبيعي وآخر مرتبط بالنشاط البشري، فأحيانا تكون الحجارة تحتوي على الأملاح داخل مساماتها قبل إستغلالها، وفي المناطق الساحلية يعتبر البحر من بين المصادر الرئيسة للأملاح خاصة ملح كلورير الصوديوم ($NaCl$)، تنقل هذه الأملاح عن طريق الرياح والتيارات الهوائية لمسافات طويلة تصل أحيانا إلى عشرات الكيلومترات بعيدا عن الساحل.[2]

كما تعتبر بعض مواد البناء مصدرا آخر للأملاح، كالملاط الإسمنتي بالنسبة للأملاح القاعدية، وكذا مادة الجص بالنسبة لكبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$)، وتلعب بعض الغازات الملوثة دورا في تشكيل بعض الأملاح كما هو الحال بالنسبة لغاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) الذي يساهم في تشكيل الكبريتات، وفي بعض الأحيان تؤدي بعض مواد الترميم غير الملائمة إلى تشكل أملاحا قابلة للذوبان كنواتج ثانوية لتفاعلها[3]، وفيما يلي جدول يلخص أهم الأملاح المؤثرة على الحجارة وأهم مصادرها:

---

[1] Domasloswski (W), Op.Cit., p.32

[2] Arnold (A), «*Altérarion et conservation d'œuvres culturelles en matérieux poreux affféctés pas des sels* », le dessalement des matériaux poreux, journées d'études de la SFIIC, Poitiers mai 1996, pp.03-20

[3] Ibid.

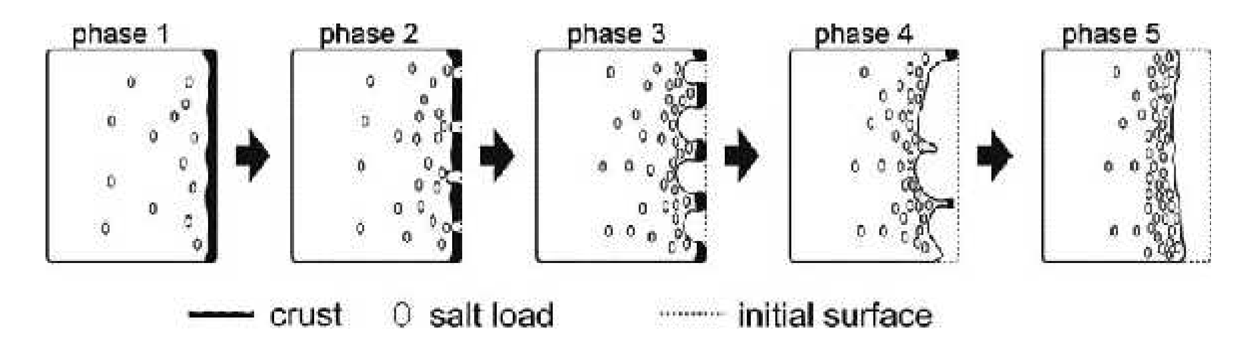
المصدر الرئيس	**نوع الملح**
إسمنت بورتلندي، ملاط إسمنتي، خرسانة	كبريتات الصوديوم
إسمنت بورتلندي، ملاط إسمنتي، نواتج تنظيف كيميائي	كربونات الصوديوم، البوتاسيوم
البحر	كلورير الصوديوم
الأرضية	كلورير البوتاسيوم
جص، ملاط جصي، لثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، نشاط بكتيري	كبريتات الكالسيوم
حجارة دولوميتية، جير مغنيزي	كبريتات المغنيزيوم
مواد عضوية متحللة، نشاط بكتيري	نيترات الصوديوم
مواد عضوية متحللة، نشاط بكتيري، أسمدة	نيترات البوتاسيوم

الجدول رقم 1: أنواع الأملاح المسبّبة في تلف الحجارة الأثرية وأهم مصادرها (Angeli (M) 2007)

- آلية التلف:

هناك عدة ظواهر تتدخل في نوعية ودرجة تأثير الأملاح على الحجارة، من بينها ضغط التبلور وضغط التميه والضغط الأسموزي والتمدد الحراري، كل هذه الآليات تلعب دورا في فقدان تماسك الحجارة الأثرية، لكن يبقى ضغط التبلور العامل الرئيس لتأثير الأملاح في الوسط المسامي.[1] (الشكل رقم: 1)

[1] Angeli (M), *Etude multiéchelle de la dégradation des roches par la cristallisation de sels dans les réseaux poreux*, Université de Cergy-Pontoise, doctorat Soutenue novembre 2007, p.66



الشكل رقم 1: شكل يبيّن مراحل التلف الحجارة بفعل تبلور الأملاح وفقدان تماسك العناصر المشكلة للسطح

(Rothert (E) 2008)

تنتقل الأملاح القابلة للذوبان داخل الشبكة المسامية مذابة في الماء على شكل محاليل، ويعاد تبلورها نتيجة التبخر الكلي أو الجزئي للماء، فبالإضافة لتأثير إرتفاع في درجة الحرارة تنتقل جزيئات الماء إلى الطور الغازي لما يكون الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء (وهو جزء من الضغط الجوي الكلي) أقل من ضغط بخار الماء المشبع للمحلول (هو قيمة الضغط الذي يتحول فيه السائل إلى غاز في درجة حرارة معينة).[1]

أثناء تبخر الماء المشكّل للمحلول المالح داخل الحجارة يزداد تركيز الأملاح وتترسّب بفعل عملية التشبع الإضافي (Sursaturation)، فبالنسبة للمحلول الذي يحتوي على عدة أنواع من الأملاح تترسّب هذه الأخيرة تباعا بحسب درجة ذوبانيتها، وتترسّب في مكان واحد إذا كان المحلول في حالة إستقرار، وفي أماكن مختلفة إذا كان المحلول في حالة حركة.[2]

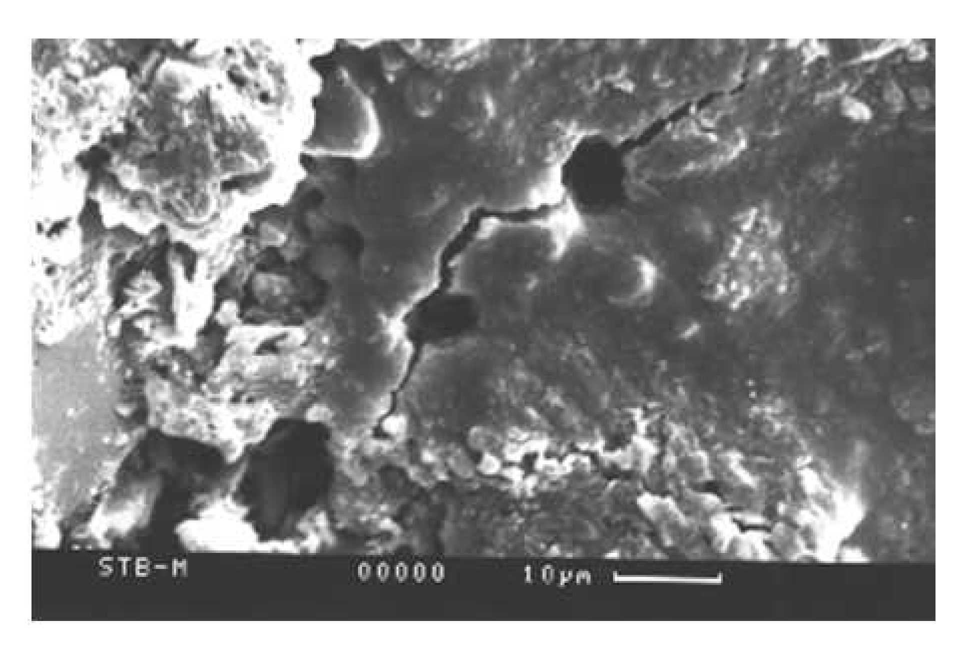
عند تبخر الماء عبر المسامات المفتوحة للحجارة فإن الأملاح يعاد تبلورها في الأجزاء التي يكون فيها التبخر شديدا، وتتوّضع الترسبات الملحية في مسامات الطبقة

[1] Desarnaud (J), *Mécanisme de Croissance et de dissolution de cristaux de KCl sous Charge :Apport dans la connaissance des mécanismes d'altération des pierres par les sels*, université Paul Cezanne, doctorat soutenu novembre 2006, p.17

[2] Arnold (A), Op.cit., pp.03-21

السطحية والشقوق الدقيقة، فتتشكل بلورات ملحية بحجم ومظهر متعددين، فكبريتات الصوديوم ($NaSO_4$) يشكل ترسبا لينا، عكس كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) وكبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$) التي يشكلان طبقة صلبة، أما كبريتات البوتاسيوم (KSO_4) فيترسب على شكل طبقة زجاجية .[1]

إن خطورة إعادة تبلور الأملاح داخل الشبكة المسامية للحجارة تكمن في زيادة حجم هذه الأملاح مما ينتج عنه نشوء ضغط داخلي، أحيانا تكون قوة هذا الضغط تفوق المقاومة الميكانيكية للحجارة، ومع إستمرار الضغط وتكرار الظاهرة يؤدي إلى ظهور تشققات وفقدان لتماسك عناصر الحجارة في الطبقة السطحية، وأحيانا تتعداها إلى العمق لعدة سنتيمترات، تكون الشقوق في البداية على المستوى المجهري للمادة وتبدأ في الإتساع حتى تأخذ أبعادا يمكن مشاهدتها بالعين المجردة. (الصورة رقم: 14)



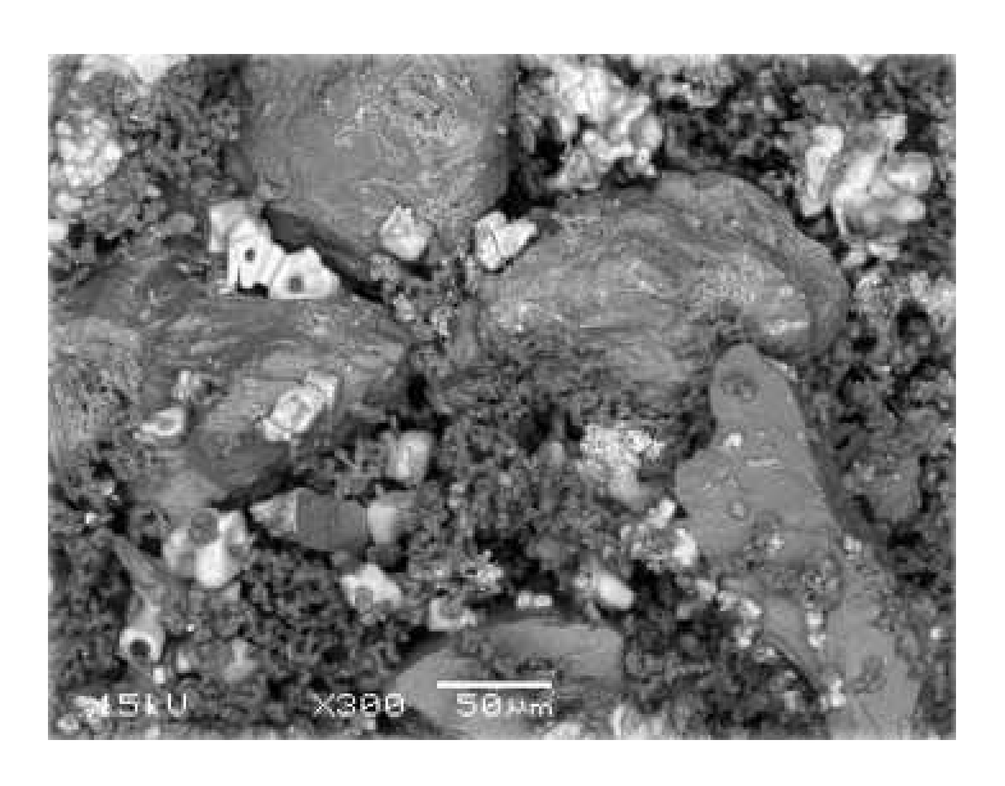
الصورة رقم 14: صورة (MEB) تبين شقوق بين المسامات بفعل تبلور الأملاح

(Nicholson (T) 2000)

---

[1] Beck (K), *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, thèse de doctorat en sciences des matériaux, université d'Orleans, soutenue octobre 2006, p.17

تتشكل البلورات الملحية في البداية في المسامات الكبيرة نوعا ما وفي الشقوق الدقيقة، ويلعب المحلول المالح الموجود في الشعيرات دورا هاما في تزويد البلورات المتشكلة بالعناصر الكيميائية التي تؤدي إلى نموها، فعند شغل البلورات كل فضاء المسامة يتولد ضغط على جدرانها، وبإمتلاء المسامات الكبيرة تتبلور الأملاح المذابة في الشعيرات الدقيقة بفعل زيادة التركيز الناتج عن عملية التبخر مما يسبب ضغط إضافي، فإنطلاقا من النسبة بين المسامات الكبيرة والصغيرة يمكن تحديد الضغط بصفة إجمالية، بحيث كلما كانت المادة تحتوي على نسبة كبيرة من المسامات الصغيرة المفتوحة كلما كان الضغط المطبق داخل الشبكة المسامية أكبر.[1]



الصورة رقم 15: صورة مجهرية (MEB) تبين بلورات (NaCl) (الأبيض) وبلورات ($MgSO_4.6H_2O$) (الرمادي) ما بين بلورات الكواتز (العناصر الكبيرة) لعينة من حجارة رملية مصابة بتفتت حبيبي

(Nicholson (T) 2000)

[1] Lewin (S.Z), « *The conservation of limestone objects and structures* », in Colloque sur l'altération des pierres : conférences, Bruxelles 1967, pp.41-51

تعتبر الأملاح من بين المواد المستطربة (Hygroscorique)، كونها تتأثر بتغيرات في الرطوبة النسبية والحرارة، فتتبلور وتكون مستقرة في نسبة معينة من الرطوبة تسمى بالرطوبة النسبية للتوازن، تصبح الأملاح أكثر تميها بإرتفاع نسبة الرطوبة وأحيانا تشكل محاليل مالحة، والجدول التالي يلخص ذوبانية أهم الأملاح ودرجات رطوبتها النسبية للتوازن:

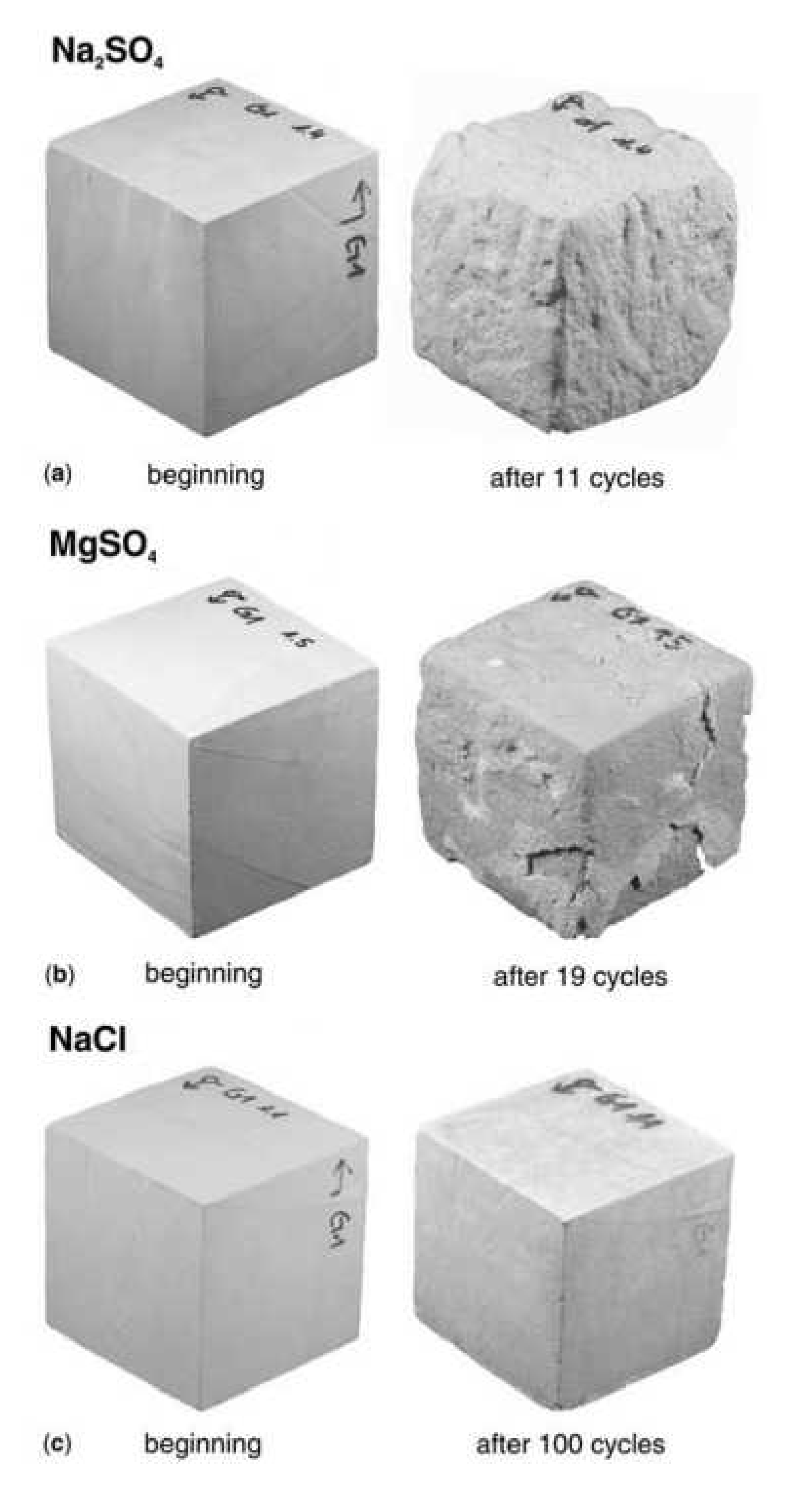
الملح	**الذوبانية غ/ل في 20-25º**	**الرطوبة النسبية للتوازن %**
Natron $Na_2 CO_3, 10H_2O$	220	98 – 88
Thermonatrite $Na_2 CO_3, H_2O$	160	95
Thénardite $Na_2 SO_4$	388	82
Mirabilite $Na_2 SO_4. 10H_2O$	110 – 193	94 – 91
Halite NaCl	360	75 – 75
Nitrate de potassium KNO_3	47	95 – 94
Gypse $CaSO_4. 2 H_2O$	2.4	100

الجدول رقم 2: جدول يبين ذوبانية والرطوبة النسبية للتوازن لبعض الأملاح

(Angeli (M) 2007)

تختلف درجة تأثير الأملاح على الحجارة الأثرية بحسب نوع الملح وتأثيره، فكلورير الصوديوم له تأثير ضعيف إذا ما قورن بكبريتات الصوديوم وكبريتات المغنيزيوم (الصورة رقم: 16)، غير أن درجة التلف لا ترتبط فقط بنوع الملح، فنسبة تشبع وتركيز المحاليل في الشبكة المسامية لها أيضا دور كبير في درجة التلف، إلى جانب سرعة التبخر التي تكون كبيرة في الوسط الجاف وعندما تكون الحجارة معرضة لأشعة الشمس، بالإضافة إلى التبلور الدوري والمستمر للأملاح.[1]

[1] Doehne (E) & Clifford (A), *Stone Conservation An Overview of Current Research*, The Getty Conservation Institute, Second Edition, Los Angeles 2010, p.15



الصورة رقم 16: نتائج إختبارات تبين درجة تأثير الأملاح على عينات حجرية بعد عدة دورات غمر في المحلول المالح/ تجفيف

a/ كبريتات الصوديوم تلف شديد بعد 11 دورة b/ كبريتات المغنيزيوم تلف شديد بعد 19 دورة c/ كلورير الصوديوم بداية التلف بعد 100 دورة

(Rothert (E) 2008)

تلعب ظاهرة التميّه دورا كبيرا في زيادة حجم بعض الأملاح، خاصة التي تتشكل من كتيونات (أيونات موجبة) صغيرة، هذه الأملاح لديها قابلية كبيرة لتشكيل الهيدرات، بحيث تحيط جزيئات (H_2O) بالكاتيونات وتشكل مركبات ذات قطر أكبر بكثير عن قطر الأيون، وهذا ما يعكس الزيادة في حجم الأملاح، فعلى سبيل المثال فإن إنتقال كبريتات الصوديوم ($NaSO_4$) من حالة الأندريد- الحالة الجافة- إلى هيدرات عشري ($NaSO_4.10H_2O$) يؤدي إلى زيادة في الحجم تصل إلى حوالي 400% من حجم الأندريد، وهذا ما يؤدي إلى توليد ضغط في البنية الداخلية للحجارة.[1]

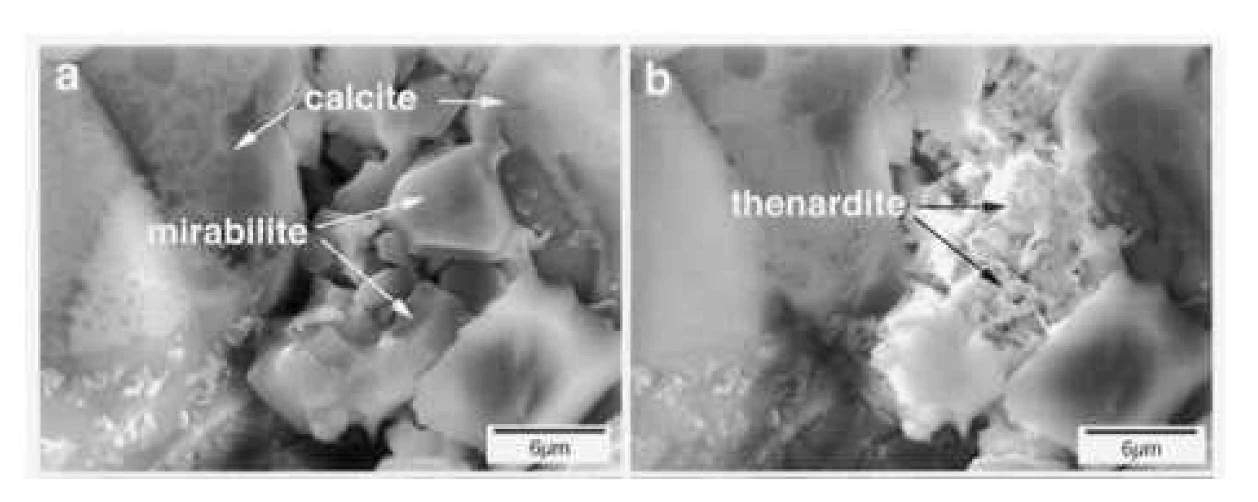
إن الزيادة في حجم الأملاح بسبب ظاهرة التميّه تحددها عدة عوامل، من أهمها درجة الحرارة وما يرافقها من تغيير في ضغط البخار، فإذا كان ضغط بخار الهيدرات أكبر من ضغط بخار الوسط فإن الهيدرات يفقد جزيئات الماء والعكس صحيح، بحيث يكسب الهيدرات جزيئات الماء إذا كان ضغط بخار الهيدرات أقل من ضغط بخار الوسط، فإذا أخذنا نفس المثال السابق أي ($NaSO_4$)، فإن هذا الملح يتبلور على شكل أندريد في درجة حرارة حرارة 24.3°م، وفي مجال حرارة أقل فإنه يتبلور على شكل هيدرات، كما أن لهذا الملح طورين في درجة الحرارة العادية، وذلك بحسب الرطوبة النسبية، طور جاف يسمى حينها تينارديت (Thénardite) وطور ثاني عشاري التميّه ويسمى ميربيليت (Mirabilite) بالإضافة إلى أطوار أخرى انتقالية،[2] (الصورة رقم:17) ومن بين الأملاح التي لها قابلية كبيرة للتميه نجد:[3]

- كربونات الصوديوم ($NaCO_3$) وهي من بين الأملاح الأكثر خطورة، ففي درجة حرارة أقل من 32°م تتبلور مع 10 جزيئات من الماء.
- كلورير المغنيزيوم ($MgCl_2$)، تشكل هيدرات مستقر مع 6 جزيئات من الماء.
- كلورير الكالسيوم ($CaCl_2$)، يمكنها أن تشكل 4 أنواع من الهيدرات: أحادي، ثنائي، رباعي أو سداسي.

[1] Arnold (A), Op.Cit., pp.03-21
[2] Angeli (M), Op.Cit., p.66
[3] Domasloswski (W), Op.Cit., p.34

õ كلورير الصوديوم (NaCl)، يتشكل هيدرات ثنائي التميّه في درجة حرارة أقل من – 2°م، ويبقى غير مستقر في الظروف العادية .

õ كبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$)، تتميّه على شكل هيدرات ثنائي مستقر، وهو ما يعرف بالجبس (Gypse).



الصورة رقم 17: صورة (MEB) لترسّب كبريتات الصوديوم بين بلورات الكالسيت

a: ميربيليت (Mirabilite)   b: تينارديت (Thénardite)

(Rodriguez-Navarro (C) 1999)

عند إنتقال الأملاح من الهيدرات إلى أندريد أو هيدرات أقل تميّه بسبب إرتفاع درجة الحرارة وإنخفاض نسبة الرطوبة فإنها تحرّر جزيئات من الماء، بحيث يصبح الحجم الكلي للملح (أندريد أو هيدرات قليل التميّه) والماء المحرّر أكبر من حجم الهيدرات نفسه، وينشأ عن ذلك قوة ضغط إضافية داخل المسامات.[1] إذا فإن في كلتا الحالتين سواء تميّه الملح أو فقدانه لجزيئات الماء يؤدي إلى خلق قوى تطبق على الجدران الداخلية للمسامات ما قد تسبب في ظهور شقوق مجهرية تؤدي بدورها إلى نتائج خطيرة على المادة الأثرية.

[1] Torraca (G), *Matériaux de construction poreux*, traduit par Di Matteo (C), ICCROM, Rome 1986, p.33

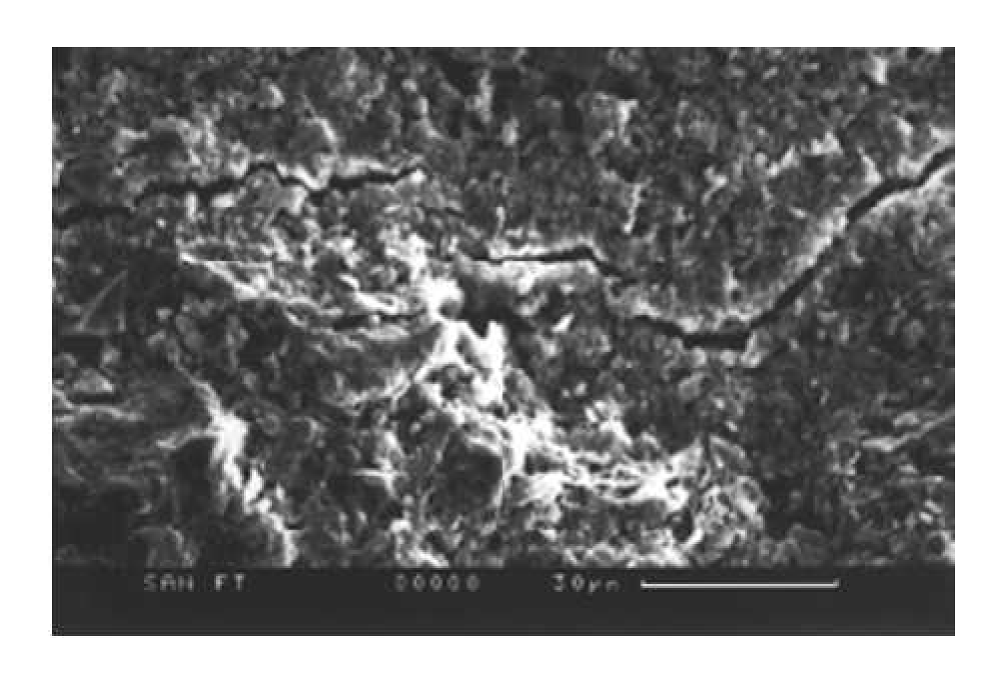
II-1-2 تجمد الماء:

يتجمد الماء عندما تنخفض درجة حرارة المياه إلى درجة الصفر المئوية، ويتجمد الماء المحتوي على شوائب مثل الأملاح، عند درجة حرارة أقل من درجة تجمد الماء النقي ، وعند تجمّد الماء فإنه يتمدد ويزداد في الحجم بمعدل حوالي 11/1، فعلى سبيل المثال عندما تجمّد 11سم^3 ن الماء ينتج عنه 12سم^3 من الجليد، وتكون جزيئات الماء غير المتجمد قريبة من بعضها، وتتحرك بسرعة وبطريقة عشوائية، وعندما يتجمد الماء تبتعد الجزيئات عن بعضها وتتحرك ببطء أكثر، وتترتب في أشكال منتظمة. (الصورة رقم: 18)



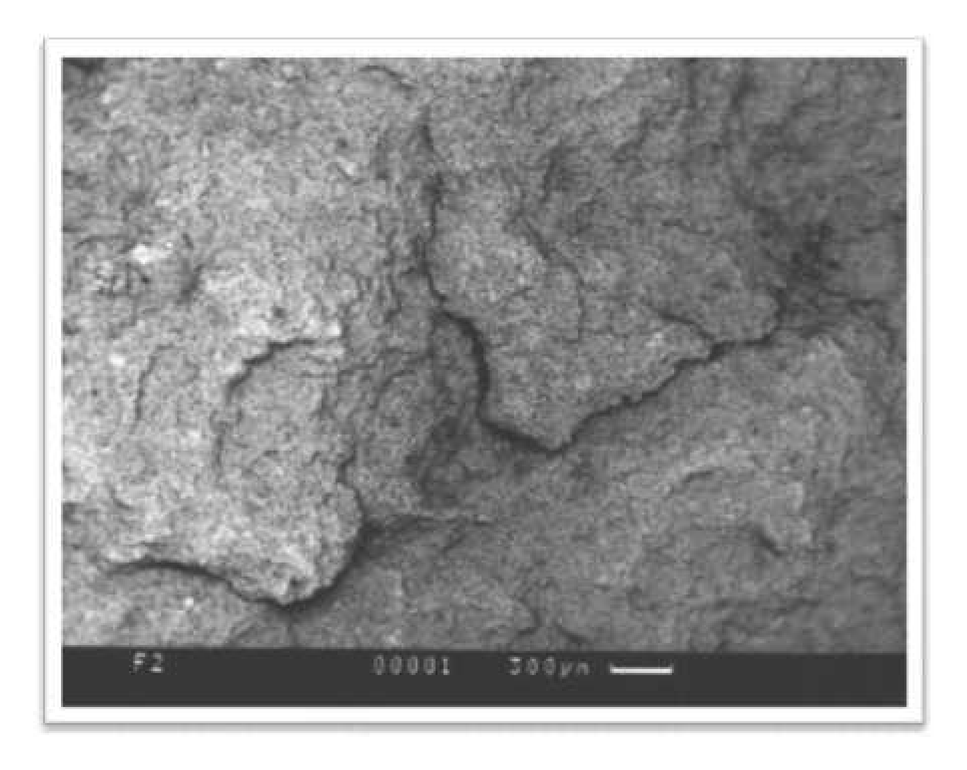
الصورة رقم 18: صور مجهرية لعدة أشكال من بلورات الجليد

(Beck (K) 2006)



الصورة رقم 19: صورة (MEB) لعينة حجرية تبين حدوث شقوق دقيقة في بفعل الجليد بعد عدة دورات جليد/ذوبان

(Nicholson (T) 2000)



الصورة رقم 20: صورة (MEB) لعينة من الحجارة تبين قشور دقيقة ناتجة عن ظاهرة تجمد الماء

(Nicholson (T) 2000)

عند إنخفاض درجة الحرارة إلى ما دون 0°م يتجمد الماء الموجود في مسامات الحجارة ويزيد حجمه بنسبة 9 %، مما يسبب في خلق ضغط ميكانيكي قد يؤدي إلى تلف الحجارة، ويظهر ذلك من خلال تشكّل شقوق وفقدان تماسك لبعض أنواع الحجارة، وفي بعض الأحيان يؤدي الجليد إلى إنفلاق وإنفصال أجزاء من سطح الحجارة، وتكمن الخطورة في التجمد الدوري والمتكرر للماء داخل الشبكة المسامية. (الصورة رقم: 19،20)

بإنخفاض درجة الحرارة يبدأ الماء القريب من السطح بالتجمد، ومنه يطال التجمد الماء المنحسر في المسامات الكبيرة، وبعدها إلى عمق الحجارة، يتم دفع جزيئات الماء التي لم تتجمد إلى داخل المسامات الصغيرة، وهذا بفعل قوة الضغط التي يمارسها الجليد، إذا كانت كمية الهواء داخل الشبكة المسامية معتبرة فإنه يشكّل فقاعات متقاربة فيما بينها والتي تمتص الضغط الذي تسببه الزيادة في حجم الجليد داخل المسامات، ففي هذه الحالة تكون الحجارة في منئ من تأثير قوى الجليد، أما إذا زادت نسبة الماء داخل المسامات عن حد معين فإن كمية الهواء تصبح غير قادرة على إمتصاص الضغط الذي في بعض الحالات تفوق قوته مقاومة الحجارة، ففي بعض الحالات قد تصل قوة الضغط لحدود 200MPa.[1]

عند بداية تشكّل بلورات الجليد تصطفّ جزيئات الماء وفق نظام سداسية بواسطة روابط هيدروجينية، هذه الأخيرة تُبقي جزيئات الماء على مسافة محددة خلافا لما هو عليه في الحالة السائلة ما يؤدي إلى إنخفاض كثافة الجليد، ففي 0°م تكون كثافة الجليد في حدود 0.9169 أي بزيادة 9.1 % من حجم الماء السائل، وإبتداءا من 4°م تبدأ الحركية الحرارية لجزيئات الماء في التناقص لتتشكل الروابط الهيدروجينية ويبدأ الحجم الخصوصي للماء في التزايد،[2] وتتحكم في هذه ظاهرة تجمد الماء في الشبكة المسامية للحجارة عدة عوامل من أهمها:

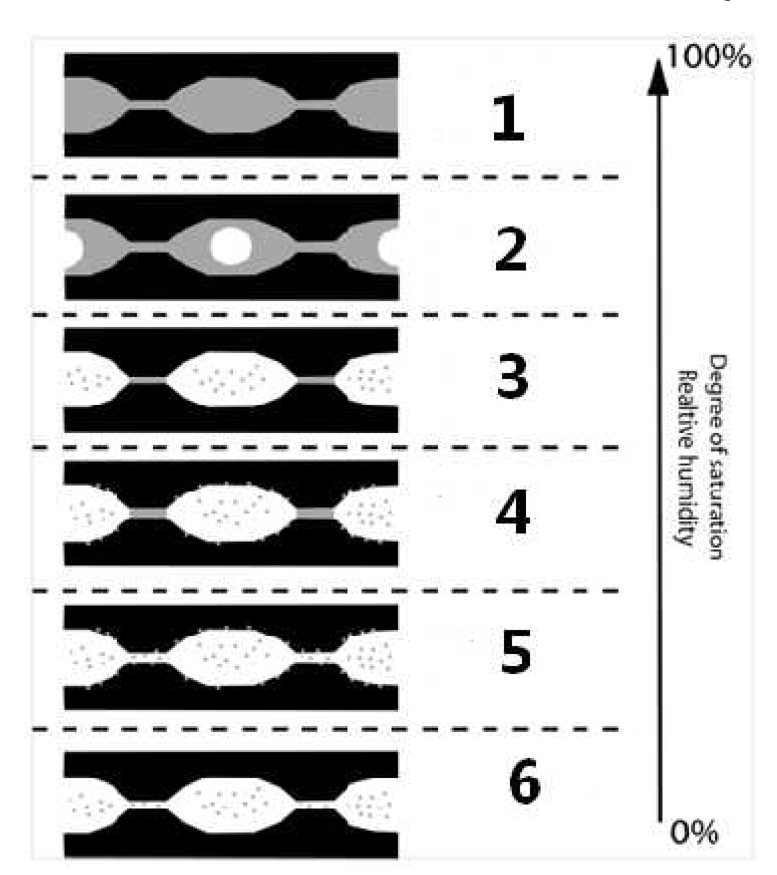
---

[1] Ezzdine (R), Op.Cit., p.14

[2] Bost (M), *Altération par le gel des massifs rocheux: Etude expérimentale et modélisation des mécanismes dégénération des contraintes dans les fissures*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, thèse de doctorat soutenue en février 2008, p.58

أ- نسبة تشبع المسامات بالماء:

تعتبر نسبة تشبّع الشبكة المسامية بالماء عاملا رئيسا في مدى تأثير الجليد على الحجارة، يمكن تحديد هذه النسبة بواسطة معامل التشبّع.[1] تكون خطورة الجليد إذا تجاوزت نسبة الماء داخل الحجارة 87%، أي معامل تشبع يفوق 0.8 وكلما كانت النسبة أكبر كانت إمكانية التلف أكبر، لكن توزيع الماء في الشبكة المسامية غالبا ما يكون غير متجانس، لذا فقد يكون التلف الذي يسببه الجليد محصورا في أجزاء معينة والتي عادة ما تكون في الطبقات الخارجية، حيث تظهر شقوق وقشور وفقدان تماسك على سطح الحجارة.[2]



الشكل رقم 2: شكل توضيحي يبين مختلف مراحل إمتلاء المسامات بالرطوبة

1: تشبع المسامات بالماء 2: امتلاء الشبكة المسامية 3: امتلاء الشعيرات 4: تكاثف قطرات الماء

5: حركة الماء على شكل بخار 6: إمتزاز جزئات الماء على جدران المسامات

(Beck (K) 2006)

[1] Iniguez herrero (J), *Altération des calcaires et des grés utilisés dans la construction*, traduit par Stichelbaudt (J), éditions Eyrolles, Paris 1967, p.23

[2] Mamillan (M), *Pathologie et restauration des constructions en pierres*, DAPCO, Rome 1975, p.21

ب- درجة الحرارة:

تؤثر الحرارة بطريقة مباشرة على شدة الضغط المطبّق من طرف الجليد، بحيث تتغيّر قيمة الضغط بتغيّر درجة الحرارة، فكلما إنخفضت درجة الحرارة قابلها زيادة في قوة الضغط، وفيما يلي بعض درجات الحرارة وما يقابلها من قوة ضغط الجليد:[1]

- عند درجة حرارة 0°م تكون قيمة ضغط الجليد في حدود 6 كلغ/سم^2 .
- عند درجة حرارة - 5°م تكون قيمة ضغط الجليد في حدود 610 كلغ/سم^2.
- عند درجة حرارة - 15°م تكون قيمة ضغط الجليد في حدود 1590 كلغ/سم.^{2}
- عند درجة حرارة - 20°م تكون قيمة ضغط الجليد في حدود 1970 كلغ/سم^2.
- عند درجة حرارة - 22°م تكون قيمة ضغط الجليد في حدود 2115 كلغ/سم^2.

عند درجة حرارة 0°م أي عند بداية تجمد الماء نلاحظ أن قيمة الضغط صغيرة جدا (6 كلغ/سم^2) إذا ما قورنت بقيم الضغط الأخرى، ويمكن تفسير ذلك أن الماء في بداية تجمّده يكون ذو طبيعة لدنة، فعند هذه الدرجة يكون تأثير الجليد شبه منعدم، وبإنخفاض درجة الحرارة تزداد قيمة الضغط المطبّق من طرف الجليد حتى يصل ذروته عند درجة حرارة - 22°م حيث يصبح الضغط ثابتا، وهي الدرجة التي فيها الضغط في أقصى قيمته (2115 كلغ/سم^2) حيث تصل نسبة الزيادة في حجم الجليد حوالي 13.2%.[2]

ج- طبيعة الماء داخل المسامات:

تختلف خصائص وطبيعة الماء الموجود في الشبكة المسامية للحجارة وتؤثر هذه الإختلافات على مدى تجمّده، وأظهرت الدراسات أن نسبة الماء المتجمّد داخل

[1] Domasloswski (W), Op.Cit., p.35
[2] Ibid., p.36

الحجارة في مجال حراري بين 0 إلى - 5°م لا تتجاوز 60% من إجمالي الماء، ويمكن تقسيم أنواع الماء المحتجز في الشبكة المسامية إلى:[1]

- **الماء الحر:** للماء الحر (Eau libre) نفس الخصائص الفيزيوكيميائية للماء العادي، ينتقل داخل الشبكة المسامية على شكل سائل أو بخار.
- **الماء المستطرب:** يتواجد الماء المستطرب (Eau hygroscopique) على شكل غشاء دقيق جدا (مجهري) أحادي الجزيئات متصلة فيما بينها بروابط بين جزئية (Liaisons intermoléculaires)، ويتميز هذا الماء بصعوبة إنتقاله حتى في حالته البخارية، وله مقاومة كبيرة للتجمّد.
- **ماء الربط:** يتشكل ماء الربط (Eau d'adhésion) في شكل جيوب دقيقة لا يتعدى سمكها 0.1µ تلتصق بشدة بجدران المسامات، ويتميز بوزنه الخصوصي الذي يتراوح بين 1.3 إلى 2.4 غ/سم^2، وبدرجة تجمّده المنخفضة جدا تصل إلى حدود – 78°م، وتتغيّر هذه الخصائص وتقترب أكثر إلى خصائص الماء الحر كلما إتجهنا من طبقات الماء الملتصقة بجدران المسامات نحو المركز.

3-1-II التغيرات في درجة الحرارة:

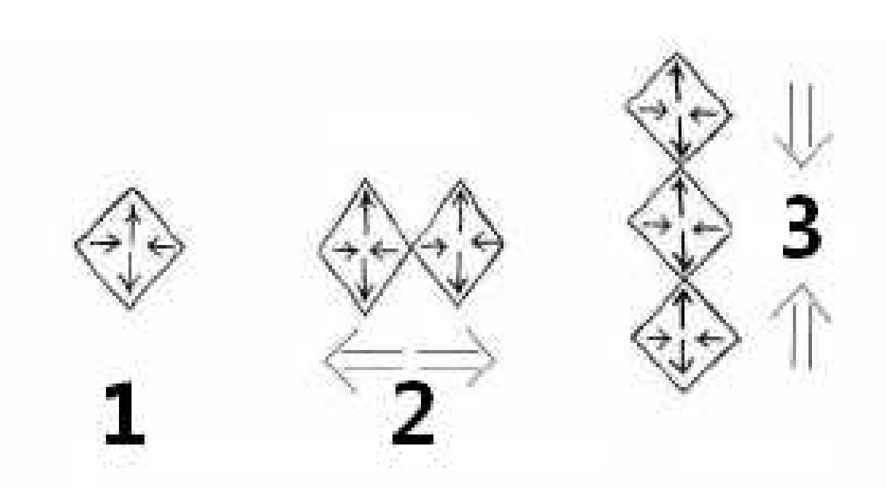
يمكن للتغيرات السريعة والمتكررة في درجات الحرارة أن تؤدي إلى تلف الحجارة بسبب إختلاف في تمدد وتقلص العناصر الفلزية المكونة لها، وهذا النوع من التلف نجده شائعا في المناطق الحارة والمشمسة، أين يمكن أن تصل درجة حرارة سطح الحجارة أحيانا إلى حدود 50°م، وتنخفض حتى تصل إلى حدود 0°م ليلا، يؤدي هذا التباين الكبير في درجة إلى إضعاف تماسك الفلزات فيما بينها، بسبب الإختلاف في معامل تمددها الحراري.

عند إرتفاع درجة الحرارة يزداد حجم الطبقة الخارجية بسبب تمدد الفلزات المكونة لها، عكس الطبقات الداخلية التي تصلها كميات أقل من الحرارة وبالتالي تكون

[1] Domasloswski (W), Op.Cit., p.37

نسبة التمدد صغيرة إذا ما قورنت بنسبة تمدد الطبقة الخارجية، هذا التباين في التمدد ينتج عنه فقدانا في التماسك وظهور شقوق وتصدعات،[1] وتؤدي هذه الظاهرة إلى إنفصال طبقي ويظهر ذلك جلي بالنسبة لبعض للصخور الرسوبية، كما تؤدي أيضا إلى ظهور شقوق وتفتت حبيبي على سطح الحجارة.

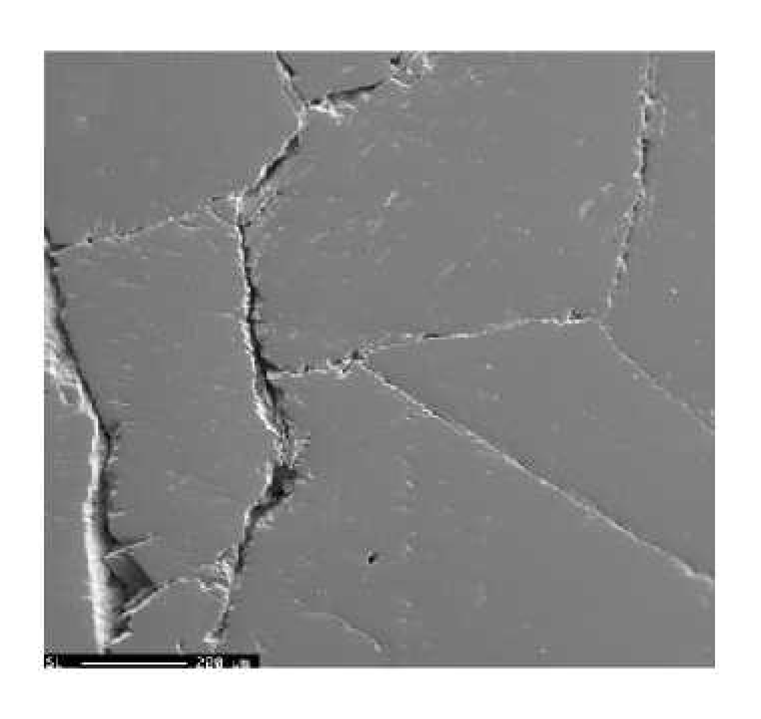
إن التغيّر في درجة حرارة المادة عادة ما يرافقه تغيّر في الحجم، بعض الفلزات لها خاصية تباين الخواص في مختلف الإتجاهات (Anisotrope) في ما يتعلق بالتمدد الحراري، وتتميّز بلورات الكالسيت أو الأراغونيت الكبيرة أكثر بهذه الخاصية، فيكون إختلاف معامل التمدد بين إتجاهي البلورة نفسها، ففي الإتجاه المحوري للبلوررة يصل معامل التمدد الحراري إلى 25 . 10^{-6} م/م.م° (متر/متر. درجة الحرارة) بينما في الإتجاه العمودي للمحور فالمعامل يساوي 5 . 10^{-6} م/م.م°. فعند إرتفاع درجة الحرارة تتمدد البلورة أكثر في الإتجاه المحوري مما يسبب في إحداث ضغط يؤدي لإنفصام البلورةذن ومن جهة أخرى تنفصل بلورات الكالسيت عن بعضها نتيجة فقدان تماسكها وظهور تفتت حبيبي على السطح، وهو ما يمكن مشاهدته بشكل جلي بالنسبة للرخام.[2]



الشكل رقم 3 : رسم توضيحي يبين اتجاهي تمدّد بلورة الكالسيت

(Toracca (G) 2009)

[1] Komar (A), *Eléments et matériaux de construction*, édition MIR, Moscou 1969, p.17
[2] Torraca (G), Matériaux poreux…, Op.Cit., p.29



الصورة رقم 21: صورة مجهرية (MEB) تبين إنفصام في لبلورات الكالسيت نتيجة التمدد الحراري

(Cary Eppes (M) 2010)

تخلق التغيرات اليومية والفصلية في درجة الحرارة دورات حرارية يمكن أن تسبب في تلف الحجارة، إن آلية تلف الحجارة الأثرية بفعل تغيرات درجة الحرارة قد تكون بحسب دورات فصلية، وأحيانا دورات قصيرة جدا كالإنتقال إلى الظل بعض تعرض طويل للشمس أو العكس، ويكون تغيّر في درجة حرارة الحجارة في حدود 1 درجة مئوية/ساعة أو أكثر بحسب فصول السنة.[1]

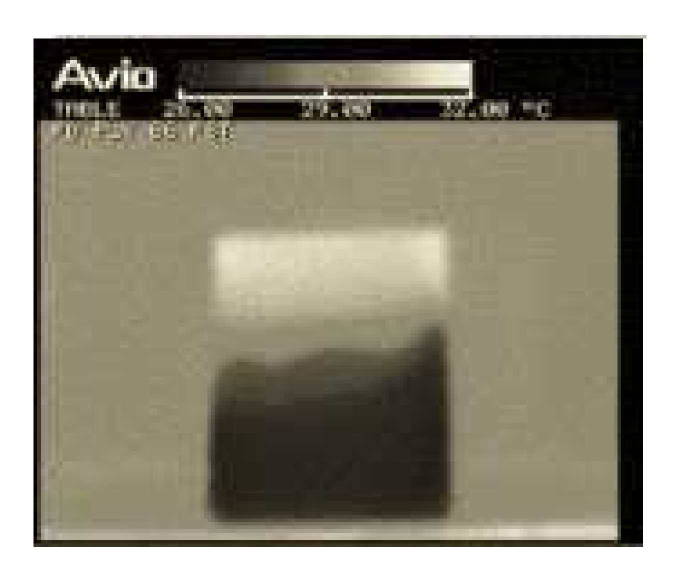
تؤثر التغيرات في درجة الحرارة في الحجارة عبر عدة آليات، فقد يكون التمدد الحراري غير متساو بالنسبة لنفس الفلز كما هو الحال بالنسبة للكالسيت كما بيّنا سلفا، أو من خلال التباين في التمدد بين الفلزات المشكلة للحجارة، وأيضا الإختلاف في التمدد بين الطبقة الخارجية والطبقة التي تليها بفعل إختلاف في درجة حرارة الطبقتين، فمثلا عند يصبح الجو أكثر برودة تنخفض درجة حرارة الطبقة السطحية وتبدأ الفلزات في التقلص، بينما الطبقات الداخلية تحافظ على درجة حرارتها أي تحافظ على تمددها

[1] Ezzedine (R), Op.Cit., p.14

مما يخلق ضغط على السطح، والعكس يحدث إذا تعرضت الحجارة للشمس فإن إرتفاع درجة حرارة الطبقة السطحية يكون أسرع من إرتفاعها في الطبقات الداخلية مما يسبب عدم تجانس في توزيع الحرارة بين مختلف الطبقات (الصورة رقم: 22)، وبتعاقب وإستمرار هذه العوامل تؤدي في النهاية إلى إضعاف الحجارة وفقدانها لتماسكها بصفة تدريجية،[1] كما أن معامل التمدد الحراري يختلف بإختلاف إتجاه الترسيب بالنسبة للحجارة الرسوبية. (الجدول رقم: 3)

	الاتجاه	معامل التمدد الحراري الافقي المتوسط $x10^{-6}\ °C^{-1}$
الحجارة الكلسية	موازي لطبقات الترسيب	2.8
	عمودي على طبقات الترسيب	4.2

الجدول رقم 3: جدول يبين معامل التمدد الحراري الأفقي المتوسط بالنسبة للحجارة الكلسية حسب إتجاه الترسيب بالنسبة للحجارة الرسوبية
(Toracca (G) 1988)



الصورة رقم 22: صورة حرارية لإختلاف في إنتشار الحرارة بين طبقات عينة من حجرية الرملية بعد تعريضها للحرارة
(Avdelidis (N.P) 2003)

[1] Ezzedine (R), Op.Cit., p.36

2-II آلية التلف الكيميائية:

1-2-II تفاعلات الكيميائية المسببة للتلف:

التلف الكيميائي ناتج عن تفاعلات تؤدي إلى تغيّر في التركيبة الكيميائية لبعض العناصر المكونة للحجارة، وترتبط نوعية وسرعة التفاعلات الكيميائية بعدة عوامل مثل درجة الحرارة ونسبة الرطوبة ووجود محفّزات، يؤدي التلف الكيميائي إلى تفكيك الروابط الكيميائية ما بين الفلزات وأيضا ما بين الأيونات، يرافق هذا النوع من التلف تحوّل في تركيبة الفلزات المشكلة للمادة من خلال فقد أو كسب لعناصر كيميائية، ويكون الماء شرطا أساسي في كل التفاعلات،[1] والتي يمكن تلخيصها فيما يلي:

أ- الذوبان:

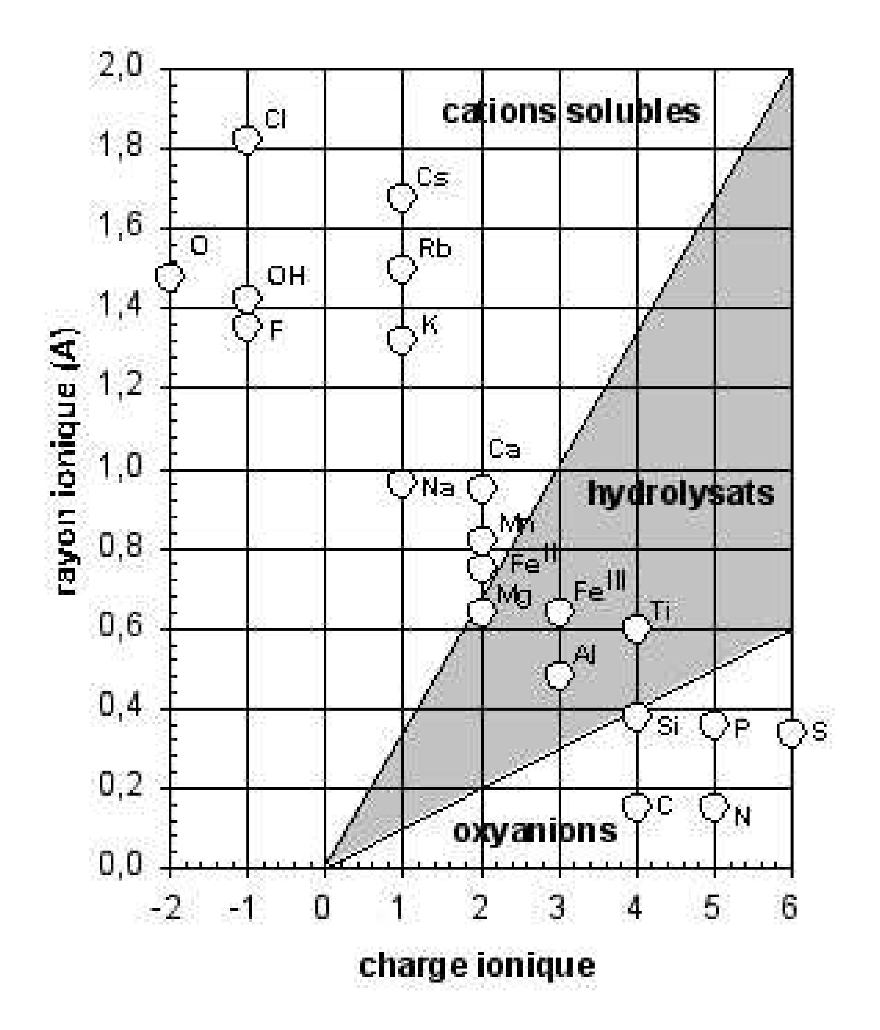
يؤدي ذوبان بعض العناصر الفلزية إلى تلف في نسيج الحجارة، تنتقل الأيونات المذابة مع الماء فتحوّل الفلزات المنفكة عنها وتحوّل فلزات أخرى التي يمكن أن ترتبط بها، عادة ما يكون هذا النوع من التلف في الحجارة الكلسية، إن الذوبان تفاعل تتحكم فيها حركية الأيونات في الماء، هناك ثلاثة مجموعات من الأيونات إنطلاقا من العلاقة الشحنة الأيونية / الشعاع الأيوني (charge ionique / rayon ionique) هذه العلاقة تحدد حركية الأيونات وهي:[2]

- أيونات القابلة للذوبان: تكون هذه الأيونات مذابة في محاليل وتترسب في شروط التشبّع وتبخر الماء، من بين أهم الأيونات القابلة للذوبان (Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+})
- الهيدروليزات (Hydrolysats): هذه المجموعة تشكّلها أيونات غير قابلة للذوبان وهي (Al^{3+}, Fe^{3+}, Si^{4+})
- الأوكسي-أنيونات (Oxyanions): وهي أيونات ذات شعاع صغير غالبا ما يكون أصغر من 0.4 Å، من بين هذه الأيونات (C,P,N, S) وتشكّل أوكسي-أنيونات حامضة

---

[1] Torraca (G), *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles 2009, pp.87- 88

[2] Barbe (R), *La chimie expérimentale, vol. 2 chimie organique et minérale capes et agrégation de sciences physiques*, Dunod, Paris 2007, p.212



الشكل رقم 4: منحنى غولدشميت (Goldschmidt)

(Dubois (M) 2002)

لكن لهذه العلاقات بعض الإستثناءات فبالرغم من التقارب في الشعاع الأيوني لـ (Fe) و(Mg) إلا أن سلوكهما مغاير لأن (Fe^{2+}) يتأكسد ويصبح (Fe^{3+}) وتشكل هذه الأخيرة هيدروكسيدات بينما تبقى أيونات (Mg^{2+}) مذابة في محلول، وضع العالم "غولدشميت" (Goldschmidt) منحنى بين فيه العلاقة بين شحنة الأيون وشعاعه، ووضع فيه معظم العناصر الكيميائية وفق التقسيم على أساس هذه العلاقة.[1] (الشكل رقم: 4)

[1] Dubois (M), *Processus géochimiques de surface*, Cours UFR des Sciences de la Terre de l'Université de Lille, Avril 2002

ب- التميّه:

تعتبر الهيدرات مركبات مشكلة من إرتباط جزئيات الماء ومواد كيميائية، إلا أن الماء في مركبات الهيدرات لا يرتبط على شكل جزيء (H_2O) بل يرتبط على شكل (O) أو (H) أو (OH)، ينتج عن تفاعل التميّه تشكّل الهيدرات ومثال على ذلك تحول الأندريت إلى جبس وفق المعادلة التالية:

$$CaSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O$$

يكتسب ويفقد الفلز جزيء أو أكثر من الماء، مما يؤدي إلى تغير في التركيبة الكيميائية للفلز، فتتغيّر بعض خصائص الفلز، ومن بين النتائج السلبية الزيادة في حجم الفلز ما يخلق ضغط كبير في الشبكة المسامية، ويحدث هذا التفاعل نتيجة تغير في تشبّع الماء داخل الحجارة وزيادة في الرطوبة النسبية للوسط.[1] (أنظر تأثير الأملاح)

ج- أكسدة/إرجاع:

هناك عدّة تحولات كيميائية تؤدي إلى حركة إلكترون أو أكثر من ذرة الى أخرى، هذه التفاعلات الكيميائية سواء كانت تفكّك أو إتحاد أو إحتراق أو تركيب ضوئي كلها تقتضي تفاعلين متزامنين: أكسدة وإرجاع (Oxydo-réduction)، عكس ما يوحيه تسمية تفاعل فإن عنصر (O) ليس شرطا في هذا النوع من التفاعل.[2]

يحوّل الهواء الموجود في الشبكة المسامية إلى وسط مؤكسد في حين تكون المناطق المشبعة بالماء مرجعة، هذا الإختلاف يسبب تغيرات في الفلزات ناتج عن ذوبان بعض الأيونات، هذا التفاعل يصيب بدرجة أكبر الفلزات التي تحتوي على عنصر الحديد.[3]

[1] Barbe (R), Op.Cit., p.224
[2] Ibid., p.231
[3] Ibid., p.232

د- الحلمأة:

خلال عملية الحلمأة (Hydrolyse) ينفك جزيء الماء إلى أيونين (H) و(OH)، وتأخذ أيونات الهيدروجين مكان الكتيونات المعدنية التي تربط بدورها مع أيونات الهيدروكسيد، تؤدي الحلمأة الى تفكك الفلزات ما ينتج عنه تلف كيميائي، هذه الظاهرة تصيب أكثر الحجارة السيليسية.[1]

تؤدي بعض التفاعلات الكيميائية إلى تحويل العديد من الفلزات المكونة للحجارة مما يؤدي أحيانا إلى إضعاف تماسكها، وتعتبر عائلة الفلسبات ـ أكثر الفلزات تواجدا في الصخور- من أكثر الفلزات التي يتعرض للتحوّل، فالأرتوكلاز ($2KAlSi_3O_8$) الذي يعتبر المركب الأساسي للعديد من الصخور كالغرانيت، البورفير والنايس يتحول بوجود الماء وغاز ثاني أكسيد الكربون إلى فلز الكاولنيت وهو فلز غضاري:[2]

$$2KAlSi_3O_8 + 2H_2O + CO_2 \rightarrow H_2\,Al_2Si_2O_8.\,H_2O + K_2CO_3 + 4\,SiO_2$$

الأرتوكلاز ... الكاولنيت

ويتحول الأرتوكلاز أيضا إلى فلز السيرسيت (séricite):[3]

$$3\,KAlSi_3O_8 + H_2O + CO_2 \rightarrow H_2K\,AlSi_3O_{12} + K_2CO_3 + 6\,SiO_2$$

الأرتوكلاز ... السيرسيت

II-2-2 العوامل المحددة للتلف الكيميائي:

هناك عدة عوامل عدة عوامل ضرورية لحدوث تفاعلات كيميائية وعوامل أخرى تسرّع من وثيرة هذه التفاعلات، من بين أهم هذه العوامل نجد الماء والغازات:

أ- تأثير الماء:

تعتبر الماء من المذيبات الطبيعية، وتختلف ذوبانية الفلزات في الماء بحسب خصائصها، فالحجارة الكلسية والحجارة ذات الرابط الكلسي من بين أكثر الحجارة

---

[1] Barbe (R),Op.Cit., p.239
[2] Lazarini (L) & Tabasso (L), *Il restauro della pietra*, CEDAM, Milani 1985, p.20
[3] Ibid.

عرضة للذوبان بواسطة الماء، وهذا بسبب ذوبانية كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) مقارنة بفلزات أخرى مشكلة للحجارة والتي تقدر بـ 40 – 85 ppm (وحدة للقياس تمثل جزء في المليون) في الماء النقي في الشروط العادية، فرغم هذه الذوبانية الضعيفة إلا أن الحجارة دائمة التعرض لتأثير الماء قد تفقد كمية معتبرة من مكوناتها.[1] والجدول التالي يبن ذوبانية بعض الفلزات في الماء:

الفلز	الذوبانية في ماء في 20°م (ppm)
الكوارتز SiO_2	15– 25
الكالسيت $CaCO_3$	40 - 85
الدولوميت $CaMg(CO_3)_2$	21 - 50
الجبس $CaSO_4.2H_2O$	2400
الأندريت $CaSO_4$	2000
الهاليت NaCl	264 غ/ل

الجدول رقم 4: قيم ذوبانية بعض الفلزات المكونة للصخور.

(Brahic (M) 1999)

ب- تأثير الغازات:

تساهم بعض الغازات الموجودة بكميات غير طبيعية في الوسط الملوث بتعقيد حالة حفظ الحجارة الأثرية، فبوجود الماء تذوب هذه الغازات مشكلة أحماض تتفاعل مع بعض الفلزات المشكلة للحجارة، ومن بين أهم هذه الغازات الموجود في الوسط العمراني والصناعي :

[1] Domasloswski (W), Op.Cit., p.19

õ ثاني أكسيد الكربون:

عند ذوبان غاز (CO_2) في الماء ينتج عنه حمض الكربوني:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

بالرغم من أن هذا الحمض ضعيف، إلا أنه لديه القدرة على إذابة كربونات الكالسيوم أو المغنيزيوم ويحولها إلى بكربونات وفق المعادلة التالية:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca(HCO_3)$$

يترسب بكربونات الكالسيوم على شكل ملح حمضي قابل للذوبان 1.66 غ/ل، أي حوالي 100 مرة أكبر من ذوبانية كربونات الكالسيوم، وعند جفاف سطح الحجارة يعود البكربونات إلى حالته الأصلية، إلا أن الكربونات المتشكلة من جديد تكون إما غير بلورية أو ضعيفة التبلور، وينتج عنها تكوين بقع بيضاء على الحجارة الكلسية وتظهر بشكل واضح على سطح الحجارة الكلسية النقية والرخام.[1]

يتغلغل الماء الحمضي إلى عمق الحجارة الكلسية أو الحجارة التي تتكون مادة ربطها من الكربونات والتي لها مسامية كبيرة، ما يؤدي إلى ذوبان في ($CaCO_3$)، وأثناء عملية التبخر تنتقل أملاح $Ca(HCO_3)$ مع الماء نحو سطح الحجارة، فتترسب بعيدا عن موقعها الأصلي، ويؤدي هذا إلى إعادة توزيع غير متجانس لـ ($CaCO_3$) في بنية الحجارة، وينتج عن ذلك إضعاف المناطق التي أفقرت من كربونات الكالسيوم وجعلها عرضة لفقدان تماسكها.[2]

õ ثاني أكسيد الكبريت (SO_2):

إن من بين أخطر هذه الملوثات الغازية هو غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) الذي غالبا ما يكون مصدره إحتراق الوقود*، وتكمن خطورته عند تحوله إلى حمض

---

[1] Lazzarini (L) & Tabasso (L), Op.Cit., p.23

[2] Domasloswski (W), Op.Cit., p.24

* إن احتراق المازوت- مثلا- يولد ما نسبته من 10 إلى 30% من غاز SO_2 من إجمالي ناتج الاحتراق

كبريتيكي (Acide sulfurique) أثناء تفاعله في وسط مائي، في بداية التفاعل يتشكل حمض كبريتي (Acide sulfureux):[1]

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$$

وبعد تعرض الحمض الكبريتي للأكسدة يتحول إلى حمض كبريتيكي مستقر كيميائيا:

$$2H_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2\,H_2SO_4$$

يعتبر هذان الحمضان من الأحماض القوية، بحث يتفاعل بسهولة مع كربونات الكالسيوم مشكلا أملاح كلسية:

$$CaCO_3 + H_2SO_3 \rightarrow CaSO_3 + CO_2 + H_2O$$
$$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$$

تمتاز الأملاح الكلسية الناتجة عن التفاعلين بذوبانية كبيرة إذا ما قورنا بذوبانية كربونات الكالسيوم، حيث تقدر ذوبانية ($CaSO_3$) بـ 0.045 غ/ل، أما ($CaSO_4$) فذوبانيته في حدود 2.1 غ/ل أي أكبر بحوالي 150 مرة من قيمة ذوبان كربونات الكالسيوم، كما يتفاعل أيضا حمض الكبريت مع كربونات المغنيزيوم، وينتج عنه كبريتات المغنيزيوم التي تتبلور مع 7 جزيئات من الماء، والذي تمتاز بذوبانية كبيرة:[2]

$$MgCO_3 + H_2SO_4 + 6H_2O \rightarrow MgSO_4.7H_2O + CO_2$$

- **غاز أكسيد الآزوت (N_2O_5) :**

عند ذوبان غاز (N_2O_5) في الماء ينتج عن هذا التفاعل حمض النيتريك أو ما يسمى بحمض الآزوت:

$$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$$

---
[1] Torraca (G), *Matériaux poreux*…, Op.Cit., p.40
[2] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.11

يعتبر حمض النيتريك أيضا من الأحماض القوية، يؤثر هو الآخر على الحجارة الكلسية، حيث يحوّل كربونات الكالسيوم إلى نيترات الكالسيوم ($CaNO_3$) القابلة للذوبان في الماء.[1]

II-3 آلية التلف الفيزيوكيميائية:

بالنسبة للتلف الذي تسببه العوامل البيولوجية فإنه من الصعب الفصل بين آليتين التلف، إذ غالبا ما تؤثر الكائنات الحية على الحجارة بالآليتين معا سواء بالتوازي أو بالتعاقب، لذا فقد إرتأينا أن نصنّف تأثير العوامل البيولوجية ضمن آلية التلف الفيزيوكيميائية.

تؤدي العوامل البيولوجية إلى تغيرات في خصائص الفيزيائية و/أو الكيميائية للحجارة، تختلف طبيعة ودرجة التلف البيولوجي بحسب أنواع الكائنات الحية المسببة له، في كثير من الحالات يمكن مشاهدة الكائنات والتلف التي تحدثه بالعين المجردة، مثل وجود طبقات من الطحالب بألوان متعددة على سطح الحجارة أو نمو الأشنات، أما بالنسبة للكائنات المجهرية فيلجأ عادة إلى تحاليل مخبرية لتحديد أنوعها.

II-3-1 العوامل المحددة للتلف البيولوجي:

إن التكاثر الكمي والنوعي للكائنات الحية مرتبط بشكل أساسي بمحيطها، بحيث تختلف أنواع الكائنات وتكاثرها بحسب الوسط الذي تعيش فيه ومن أهم العوامل التي تحدد هذا الوسط وتساهم في تكاثرها نجد:

أ- **الضوء**:

يعتبر الضوء مصدر طاقة أساسي بالنسبة للكائنات التي تحتوي اليخضور (الكلوروفيل) والكائنات ضوئية التغذية (Phototrophe)، يمكن لهذه الكائنات تفضيل وإختيار موجات إشعاعية بحسب ملوناتها المسئولة عن عملية التركيب الضوئي، في

[1] Domasloswski (W), Op.Cit., p.28

الإضاءة الضعيفة يكون نمو الكائنات التي تعتمد في تغذيتها على الضوء كالبكتريا والطحالب والأشنات والنباتات محدود جدا أو منعدم، وبالمقابل فإن وجود الضوء يحقّز في نمو هذه الكائنات، أما بالنسبة للكائنات التي لا يرتبط نظام تغذيتها بالضوء، يمكن أن تتأثر بهذا العامل أيضا بسبب تفاعلات ثانوية مثل التأكسد الضوئي الأنزيمي.[1]

ب- العناصر المغذية:

تستغل بعض الكائنات الحية بعض العناصر المشكلة للفلزات كعناصر مغذية، حيث تحتاج جميع الكائنات الحية لعناصر فلزية ومعدنية، فبعض الأنواع ذاتية التغذية (Autotrophes) يمكنها إستعمال عناصر كيميائية لتتم تفاعلات الأكسدة، كما أن وجود بعض العناصر مثل الحديد والكبريت في الحجارة يمكن أن يحقّز في تكاثر بعض الكائنات الدقيقة مثل بكتيريا الحديد وبكتيريا الكبريت، أما العناصر المغذية العضوية ففي كثير من الأحيان تترسّب على سطح الحجارة على شكل عناصر دقيقة موجودة في الجو[2]، إن وجود العناصر العضوية على سطح الحجارة يساهم بشكل كبير في نمو الكائنات الحية خاصة منها الفطريات، الأكتينوميسات والبكتيريا متعددة التغذية (Hétérotrophes).[3]

ج- المناخ:

عند دراسة عوامل التلف البيولوجية يجب التمييز بين المناخ العام للمنطقة والمناخ الموضعي (Microclimat)، فهناك عدة عوامل مناخية تؤثر على النمو البيولوجي وأهمها الحرارة والرطوبة ونسبة تساقط الأمطار، بصفة عامة يكون نمو وتكاثر الكائنات بشكل كبير في المناطق الحارة والرطبة، وبشكل قليل في المناطق الباردة ومحدود في المناطق الجافة، كما يجب الأخذ بعين الإعتبار التغيرات الفصلية خلال السنة، فطبقات الطحالب مثلا تختلف حسب فصول السنة ففي الفصول الجافة قد

[1] Caneva (G) & Salvadori (O), «*Altération biologique de la pierre* » in la dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de LazzarinI (L) et Pieper (R), UNESCO 1982, pp.143-180
[2] Ibid.
[3] Lazarini (L) & Tabasso (L), Op.cit., pp.38-39

تختفي تماما لكنها تترك الأبواغ (Spores) التي تنمو من جديد في الفصول الرطبة، ومن بين أهم المعايير المناخية نجد درجة الحرارة والرطوبة، حيث أن إرتفاع في درجة الحرارة يؤدي غالبا إلى نمو كبير للكائنات الحية بسبب زيادة في سرعة التفاعلات الكيميائية.[1]

يعتبر الماء أهم العوامل التي تساهم في التلف البيولوجي، حيث أن بقاء سطح الحجارة رطبا يوفر شرطا ملائما لتكاثر عدة أنواع من الكائنات الحية، ويعود بقاء الماء على السطح إلى عدة عوامل منها ما هو متعلق بالتركيبة الفلزية والمسامية وقابلية تبلل السطح، ومنها ما يتعلق بالشروط المناخية كالرطوبة النسبية للجو.

د- التلوث:

هناك عدة أنواع من الملوثات التي يمكنها أن تساهم في التلف البيولوجي للحجارة، ويمكن تقسيمها حسب حالتها إلى صلبة وغازية، تؤثر بعض هذه الملوثات خاصة منها العضوية تأثيرا غير مباشر على الحجارة، إذ غالبا ما تكون هذه العناصر والجزيئات موادا مغذية للكائنات الحية متعددة التغذية التي تنمو على السطح.[2]

في كثير من الحالات تؤدي المركبات الغازية إلى زيادة في النمو البيولوجي، وتختلف درجة تأثر الكائنات بالغازات، فبعض الدراسات بينت أن مجموعة بريوفيت (Bryophyte) والأشنات تعتبر أكثر تأثرا من غيرها، فالأشنات مثلا تكاد تنعدم في المناطق الحضرية والصناعية بسبب التلوث الناجم عن الغازات، لذا أعتبر وجود الأشنات مؤشر على عدم تلوث الجو، ولا نجد إلا نوع واحد من هذه الكائنات الذي يمكنه التكاثر في وسط ملوث وهو (*Lecanora Conizeoides*)، ومن جهة أخرى فإن تواجد ملوثات غازية في الجو قد يحفز نمو بعض الكائنات، فمثلا فإن زيادة تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في الجو تؤدي إلى تكاثر الكائنات الكلوروفيلية، وكذلك فإن زيادة في المركبات الآزوتية والكبريتية تؤدي بدورها إلى تكاثر بكتيريا دورة

[1] Caneva (G) et Salvadori (O), Op.Cit., pp.143-180
[2] Domaslowski (W), Op.Cit., p.43

الآزوت والبكتيريا الكبريتية مثل تيباسيلوس (*Thiobacillus*) التي بإمكانها تحويل غاز ثاني أكسيد الكبريت إلى حمض الكبريتيك عن طريق الأكسدة الأنزيمية.[1]

II-3-2 **آليات التلف البيولوجي:**

يضم التلف البيولوجي آليتين فيزيائية وكيميائية، فالفيزيائية يسببها الضغط الميكانيكي التي تطبقه الكائنات أثناء نموها وتكاثرها، مما قد يؤدي إلى إحداث فجوات وشقوق دقيقة وفقدان تماسك الطبقة الخارجية للحجارة، ويسبب هذا النوع من التلف الكائنات المتغلغلة في الحجارة (Endolithes)، حيث تتغلغل أجزاء من هذه الكائنات والتي هي عبارة عن جذيرات (Rhizines) في عمق الطبقة الخارجية للحجارة (الصورة رقم: 23)، وتقوم بإحتباس الماء في الشقوق والفجوات الدقيقة التي تخلفها، وهذا ما يزيد في تدهور الحجارة نتيجة لدورات ماء/ جليد المتعاقبة.[2]



الصورة رقم 23: صورة مجهرية (MEB) لعينة من الحجارة الرملية تبين تغلغل جذيرات الأشنات بين حبات الكوارتز
(Kennedy (C) 1999)

[1] Caneva (G) & Salvadori (O), Op.Cit., pp.143-180
[2] Lazarini (L) & Tabasso (L), Op.Cit., p.37

أما الآلية الكيميائية فتتمثل في التأثير المباشر على الحجارة بواسطة المركبات الكيميائية التي تفرزها الكائنات الحية خاصة منها الأحماض والأسس، فتفقد الحجارة تماسكها نتيجة لتفاعل هذه الأحماض مع فلزاتها، وتفرز معظم الكائنات مثل البكتريا الفطريات الطحالب، عدة أنواع من الأحماض منها الكربونية والكبريتية والآزوتية.[1]

II-3-3 الكائنات الحية المسببة في التلف البيولوجي:

غالبا ما يكون التأثير الفيزيائي والكيميائي للكائنات الحية على الحجارة بشكل متزامن أو متعاقب، وتنتمي هذه الكائنات إلى مجموعات تصنيف مختلفة، ومن بين أهم المجموعات التي تسبب بطريقة مباشرة أو غير مباشرة في فقدان تماسك الحجارة:

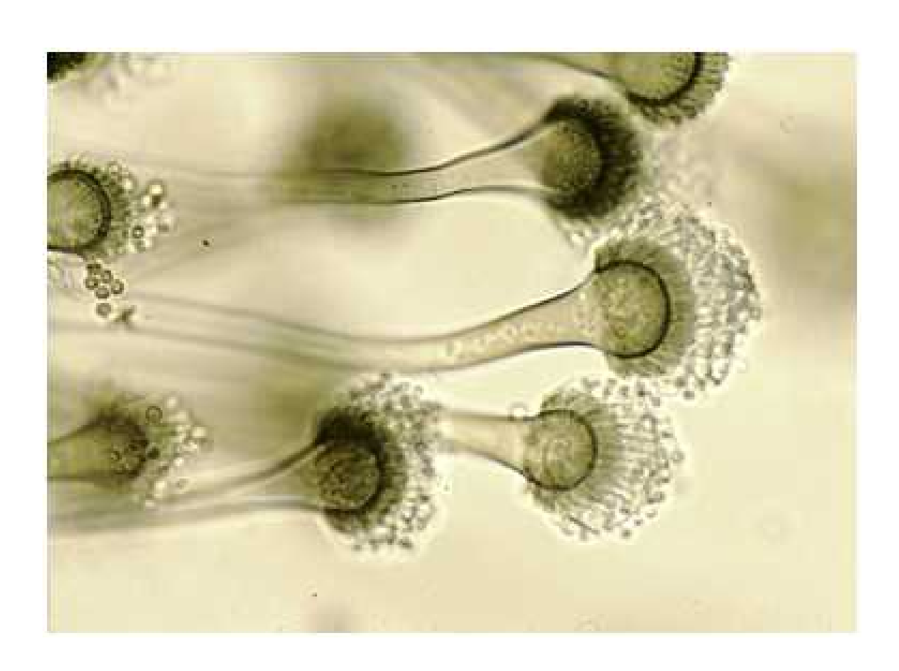
أ- الفطريات: تعتبر الفطريات (Champignons) كائنات متعددة التغذية وتساهم بدورها في تلف الحجارة، وتكمن خطورة هذه الكائنات في تأثيرها الميكانيكي والكيميائي معا، فبعض الفطريات يمكنها أن تتغلغل في الحجارة بواسطة تركيبة الخيطية (Hyphes) تساعدها على التغلغل، ويتسبب نمو الفطريات في نشوء ضغط ميكانيكي على جدران التجاويف الصغيرة التي تحدثها الأجزاء المتغلغلة، مما يؤدي أحيانا إلى إحداث تشققات على مستوى السطح وفقدان للتماسك.[2]

ويكمن التأثير الكيميائي للفطريات في تفاعل المواد التي تفرزها مع العناصر الفلزية المشكلة لسطح الحجارة ومن بين هذه المواد هناك الأحماض الكربونية والكبريتية والآزوتية إلى جانب أحماض عضوية مثل حمض اللبن ($C_3H_6O_3$)، حمض الأسيتيك ($C_2H_4O_2$) حمض الغلوكونيك ($C_6H_{12}O_7$) وحمض الأوكساليك ($C_2H_2O_4$).[3]

من خلال الدراسات تم إظهار مخبريا التأثير الكيميائي للفطريات على الحجارة، فبعد عدة تجارب إتضح بأن هذه الكائنات يمكنها إذابة كمية معتبر من بعض العناصر الكيميائية مثل: Si ,Al ,Fe ,Mg لعينات من الصخور، عملية الذوبان هذه مرتبطة

[1] Caneva (G) & Salvadori (O), Op.Cit., pp.143-180
[2] Ibid.
[3] Roques (H), *Précis de cryptogamie*, librairie Maloine, Paris 2002, pp.29-31

أساسا بحموضة الوسط بفعل الأحماض المفرزة، فبعض الأنواع من البكتيريا مثل (*Aspergillus niger*)(الصور رقم:24),(*Spicaria*), (*Penicillium*) تنتج كميات كبيرة من حمض الليمون ($C_6H_8O_7$) وحمض الأوكساليك هذا الأخير يؤدي إلى تلف الفلزات الإبتدائية وإنحلال الفلزات الغضار الحديدية.[1]



الصورة رقم 24: صورة مجهرية لفطر (*Aspergillus niger*)

(Roques (H) 2002)

الإسم العلمي للفطريات
Cladosporium orchidis
Paecilomyces lilacinus
Penicillium frequentans
Embellicia hyacinthi
Alternaria alternata
Phoma sp.

الجدول رقم 5: جدول لأهم الفطريات التي تتكاثر على الحجارة

(Roques (H) 2002)

[1] Caneva (G) & Salvadori (O), Op.Cit., pp.143-180

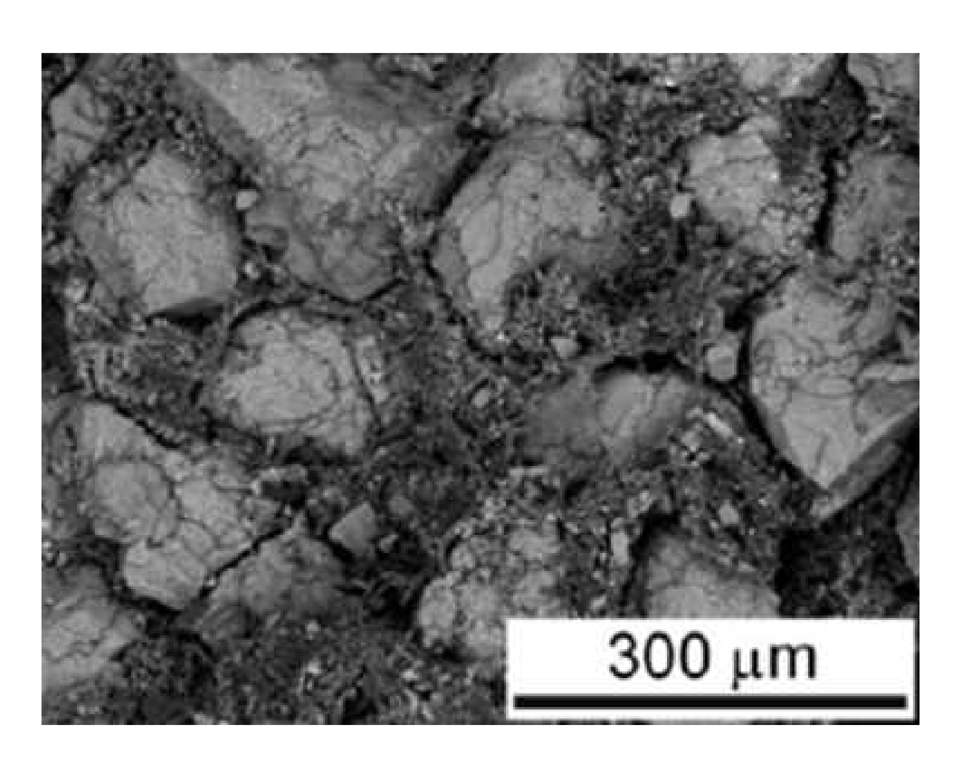
ب- الطحالب: تعتبر الطحالب (Algues) أولى الكائنات التي تستعمر سطح الحجارة، وتحتاج لنموها إلى الضوء ومواد عضوية للتغذية، تشكل الطحالب طبقات بسمك ولون مختلفين بحسب العوامل المناخية، حيث تكون الطبقات قليلة السمك والصلابة وذات لون رمادي أو أسود وأحيانا أخضر في الأماكن المضاءة والجافة نسبيا وهي العوامل التي نجدها عادة في الهواء الطلق، وتشكّل طبقات سميكة وهلامية وبألوان متعددة في الأماكن الرطبة وقليلة الإضاءة كالمغارات وداخل المباني والأقبية.[1]

تخزّن الطحالب أثناء نموها كمية من الماء الذي يسبب بدوره تدهور في سطح الحجارة، كما تترسّب على طبقات الطحالب جزيئات الغبار وبقايا عضوية وملوثات أخرى مشكلة عناصر مغذية لها فيزداد تكاثرها، كما يؤدي إلى تكاثر أنواع أخرى كالبكتيريا والأشنات.[2] ويمكن تقسيم الطحالب بحسب توضّعها على سطح الحجارة: [3]

- طحالب سطحية (Epilithe)، التي لا يتعدى نموّها سطح الحجارة.
- طحالب الفجوات (Chamolithe)، تنمو كائنات هذا النوع في شقوق وفراغات التي توفّرها الحجارة
- الطحالب المتغلغلة (Endolithe)، تتغلغل أجزاء من هذه الطحالب في عمق الحجارة

تساهم الطحالب السطحية وطحالب الفجوات في تلف الحجارة بسبب احتباسها للماء، الذي يؤدي إلى أضرار كبيرة نتيجة توالي دورات جليد/ماء، ومن جهة أخرى تفرز هذه الطحالب عدة مواد كيميائية تؤدي هي الأخرى إلى التلف، وتتمثل هذه المواد في عدة أحماض من بينها حمض الليمون، حمض الأوكساليك وحمض الغلوماتيك ($C_5H_9O_4N$)، أما الطحالب المتغلغلة فلها القدرة على إذابة كربونات الكالسيوم والتغلغل في الحجارة محدثة تجاويف صغيرة تؤدي إلى فقدان تماسك الطبقة السطحية.[4] (الصورة رقم: 25)

[1] Doehne (E) & Clifford (A),, Op.Cit., p.21
[2] Roques (H), Op.Cit., p.32
[3] Caneva (G) & Salvadori (O), Op.Cit., pp.143-180
[4] Ibid.



الصورة رقم 25: صورة مجهرية (MEB) لعينة من الحجارة الرملية تظهر تغلغل الفطريات بين حبات الكواتز

(Kennedy (C) 1999)

ج- الأشنات: تعتبر الأشنات (Lichens) من الكائنات التعايشية، تتكون في أغلب الحالات من ترافق بين طحالب مجهرية أو البكتيريا الزرقاء (Cyanobacteria) وفطريات خيطية، وتكون العلاقة بينهما تكاملية حيث تقوم الطحالب بعملية التركيب الضوئي ويقوم الفطر بإمتصاص الماء والأملاح وبذلك يتحقق التوازن في تحصيل الغذاء بين الطرفين، تسمى الأشنات التي تنمو على الصخور بالساكسيكول (Saxicoles) وتنتمي في غالبيتها إلى مجموعة القشريات، تكون الأشنات إما سطحية أو متغلغلة وتنمو بشكل خاص على الحجارة الكلسية، وتنتمي باقي الأنواع إلى مجموعات أخرى مثل المجموعة الوريقية (Foliacés)،[1] وتعتبر *(Parmelia sulcata)* الأكثر إنتشارا في الحوض البحر المتوسط، ويستعمر هذا النوع سطح الحجارة السيليسية إلى جانب الأخشاب.[2] (الصورة رقم: 26)

[1] Torraca (G), M*atériaux de construction*..., Op.Cit., p.51
[2] Caneva (G) & Salvadori (O), Op.Cit., pp.143-180



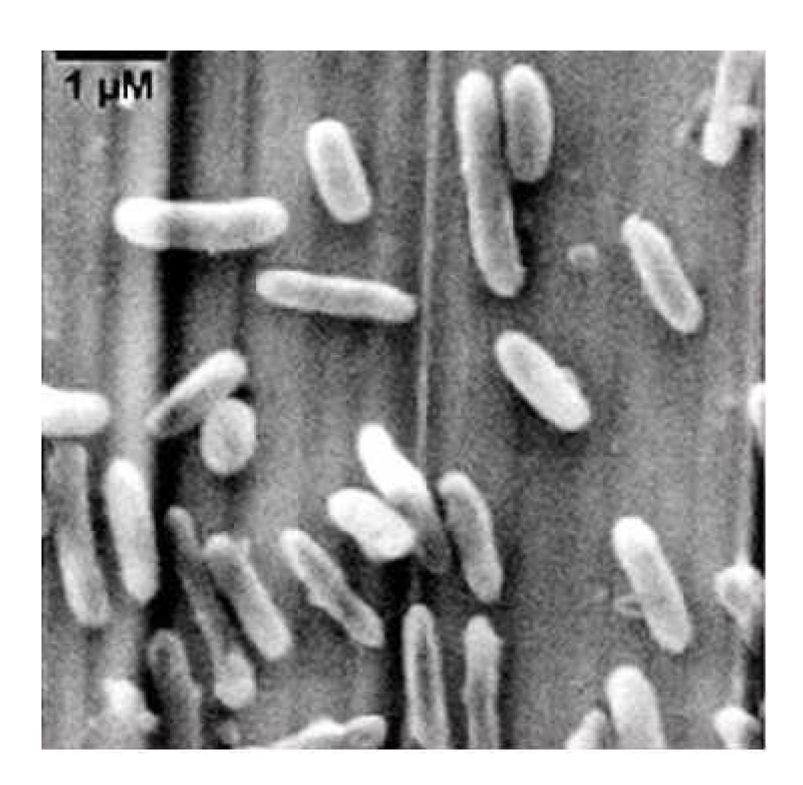
الصورة رقم 26: صورة مجهرية لمقطع طولي أشنة وريقية (*Parmelia sulcata*) تظهر الجذيرات التي يمكنها التغلغل في الحجارة

(King (C) 1999)

تتسبب الأشنات في تلف الحجارة من خلال تأثيرها الكيميائي والميكانيكي معا، ويكمن التأثير الكيميائي من خلال إفراز هذه الكائنات لمواد تتفاعل مع الحجارة، خاصة حمض الكربوني الذي يتشكل نتيجة ذوبان غاز ثاني أكسيد الكاربون (CO_2) -الموجود في الجو والناتج عن التنفس- في الماء المخزّن في جسم هذه الكائنات، كما تقوم بعض الأنواع من الأشنات بإفراز حمض الأوكساليك خاصة التي تنتمي إلى مجموعة الكلسيكول (Calcicoles)، عندما تستعمر الأشنات سطح الحجارة لمدة طويلة تفقد الطبقة السطحية للحجارة تماسكها تدريجيا بسبب القوة الميكانيكية التي تمارسها الجذيرات المتغلغلة في الحجارة مما يسبب في إنفصال جزيئات دقيقة من سطح الحجارة.[1]

[1] Caneva (G) & Salvadori (O), Op.Cit., pp.143-180

د- البكتيريا: إن البكتيريا عبارة عن كائنات مجهرية منها ما هو ذاتية التغذية ومنها ما هو متعددة التغذية، وبإمكانها التغلغل في الطبقة السطحية للحجارة، لهذه الكائنات تأثير كيميائي يؤدي أحيانا إلى تلف المادة الحجرية، من بين هذه الكائنات الحية ذاتية التغذية التي لها دور في التلف البيولوجي بكتيريا دورة الكبريت (*Thiobacillus*) (الصورة رقم: 27) وبكتيريا دورة الآزوت وبكتيريا الحديد.[1]



الصورة رقم 27: صورة مجهرية لبكتيريا الكبريت (*Thiobacillus*)

(Roques (H) 2002)

يمكن لبكتيريا الحديد أن تؤكسد الفلزات التي تحتوي على عنصر الحديد المشكل لبعض الأنواع من الحجارة كفلز البيريت (Pyrites)، وتبيّن أن البكتيريا متعددة التغذية يمكنها أن تلعب دورا في تلف الحجارة من خلال إنتاجها لأحماض عضوية مثل حمض اللبن وحمض الأسيتيك وحمض الغلوكونيك وأحماض أخرى غير عضوية، كما أنها تفرز مواد قاعدية مثل النشادر والأمينات.[2] أما بكتيريا دورة الآزوت -الذي يعتبر

[1] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.23
[2] Ibid.

الباحث "كوفمان" (Kauffman) أول من أبرز دورها في تلف الحجارة- فهي تؤثر على الحجارة الكلسية التي تستخدمها كمصدر للكربون، كما تفرز هذه الكائنات أحماضا آزوتية إنطلاقا من غاز (NH_3) الموجود في الجو الملوث، ويظهر التلف على شكل فقدان تماسك سطح الحجارة بحيث يصبح قابل للتفتّت، ولخص "كوفمان" هذا التلف من خلال المعادلة التالية:

$$2CaCO_3 + (NH_4)SO_4 + 4O_2 \rightarrow Ca(NO_3) + CaSO_4 + 2CO_2 + 4\ H_2O$$

من خلال هذا التفاعل يمكن إعتبار الأندريت ($CaSO_4$) ونيترات الكالسيوم $Ca(NO_3)$ من نواتج التلف.[1] والجدول التالي يمثل قائمة للبكتيريا التي قد تسبب تلفا للحجارة الأثرية وفق ظروف وشروط معينة:

الاسم العلمي البكتيريا	
Bacillus subtilis	*Bacillus agri*
Bacillus licheniformis	*Bacillus coagulans*
Bacillus lentimorbus	*Brevibacillus laterosporus*
Bacillus cereus	*Paenibacillus apiarius*
Bacillus mycoides	*Paenibacillus larvaepulvifaciens*
Bacillus thuringiensis kenyae	*Virgibacillus pantothenticus*
Bacillus thuringiensis sotto	*Arconobacterium haemolyticum*
Bacillus agri	

الجدول رقم 6: جدول لأهم البكتيريا التي تتكاثر على الحجارة

(Roques (H) 2002)

[1] Caneva (G) & Salvadori (O), Op.Cit., pp.143-180

الفصل الثاني: تقوية الحجارة الأثرية

I - تعريف عملية التقوية

II- تاريخ أعمال التقوية

III- طرق ومناهج تطبيق المواد المقوية

IV- أنواع المقويات

V- فعالية عملية التقوية

I- تعريف عملية التقوية:

تؤدي بعض الأنواع من التلف إلى فقدان تماسك العناصر الفلزية المكونة للحجارة، وعادة ما تظهر على السطح شقوق دقيقة وفي بعض الحالات يصبح قابلا للتفتّت إلى عمق معين، ما يستوجب القيام بعملية تقوية التي تهدف إلى:[1]

- إعادة تماسك الحجارة المتضررة.
- ضمان الإلتحام بين الأجزاء الهشة والأجزاء السليمة.
- زيادة المقاومة الميكانيكية للأجزاء المعالجة للحجارة.

وبالمقابل لا يجب على عملية التقوية أن تحدث تغيرات في خصائص أخرى مثل:[2]

- عدم التأثير المعتبر على نفاذية بخار الماء بحيث التغير في معامل النفاذية لا يجب أن يتعدى 20 %
- عدم تغيير في التمدد الحراري والمائي للحجارة
- عدم تغيير في مظهر الحجارة: لون، لمعان
- عدم تعميق في درجة التلف أو ظهور تلف جديد نتيجة مواد ثانوية ناتج عن تفاعلات كيميائية للمادة المقوية

بالنسبة للمباني والمواقع الأثرية وفي وقت ليس ببعيد كانت الحجارة التي تعرضت للتلف تستبدل وتعوّض بحجارة أخرى لها خصائص شبيهة بالحجارة المزاحة، لكن في العشريات الأخيرة ظهرت إرادة قوية للحفاظ على المواد الأثرية الأصلية، ولهذا الغرض أجريت العديد من الدراسات والأبحاث وطبقت العديد من التقنيات والمواد التي تهدف لتقوية الحجارة الهشة، التي تهدف في الأساس إلى إعادة تماسك العناصر الفلزية للحجارة ومنع إستمرار فقدان المادة الأثرية، وتدخل عملية التقوية في الإطار العام لترميم الحجارة إذ لا يمكن عزل هذه الخطوة عن باقي العمليات والتدخلات.

---

[1] Tobasso (L), « *Traitements de conservation de la pierre*», La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, p.211-224

[2] Domasloswski (W), Op.Cit., p.135

يجب على المادة المقوية أن تتغلغل بشكل جيد حتى يتم إعادة تماسك العناصر الفلزية فيما بينها، وأن تتغلغل في عمق الحجارة إلى أن تصل الى حدود الأجزاء السليمة منها كي تضمن إعادة تماسك الأجزاء الهشة التي يمكنها أن تنفصل بسهولة، أما إذا كان فقدان التماسك يصل إلى نواة الحجارة ففي هذه الحالة يجب أن يكون تغلغل كلي للمقوي، يكون التغلغل سهلا نوعا ما بالنسبة للمادة الأثرية المنقولة حيث يمكن نقلها للمخبر وعلاجها بطرق مناسبة، كما يمكن زيادة في فعالية العملية إذا تمت ذلك في وسط مفرغ من الهواء، عكس الحجارة المشكلة للعناصر المعمارية التي لا يمكن نقلها.[1] ترتبط ظاهرة التغلغل بعدة عوامل منها:[2]

- الهندسة المسامية للحجارة وخصائصها.
- الخصائص الفيزيوكيميائية للمادة المقوية: تركيبتها الكيميائية، وزنها الجزيئي، آلية تفاعلها.
- الخصائص الفيزيوكيميائية للمذيب: تركيبته الكيميائية، كثافته، لزوجته، ضغطه السطحي.
- طريقة تطبيق المقوي، مدة هذا التطبيق وطبيعة الشروط المحيطة أثناء القيام بالعملية.

غالبا ما تؤدي عملية التقوية إلى خفض في مسامية الحجارة، قد يكون هذا الخفض جزئي أي بمسامية متبقية كبيرة أو كلي بمسامية متبقية صغيرة، يرى بعض الباحثين أنه من الناحية النظرية يقّضل الحصول على الحالة الثانية أي خفض كلي للمسامية الأولية، لأن حالات كثيرة من التلف مرتبطة بالفراغات الموجودة داخل الحجارة التي تعتبر فضاء لحركة الماء وتبلور الأملاح وتجمد الماء، لكن من الصعب الحصول على خفض متجانس للمسامية، مما قد يشكل خطر إحتباس الماء في المسامات التي لم تصلها المادة المقوية بحيث لا يمكن لهذا الماء أن يتحرك أو يتبخر، ويحدث عندئذ ضغط ميكانيكي على جدران المسامات، لذا يطبق حاليا خفض جزئي

[1] Torraca (G), *Matériaux poreux* …, Op.Cit., p.87
[2] Ibid., p.119

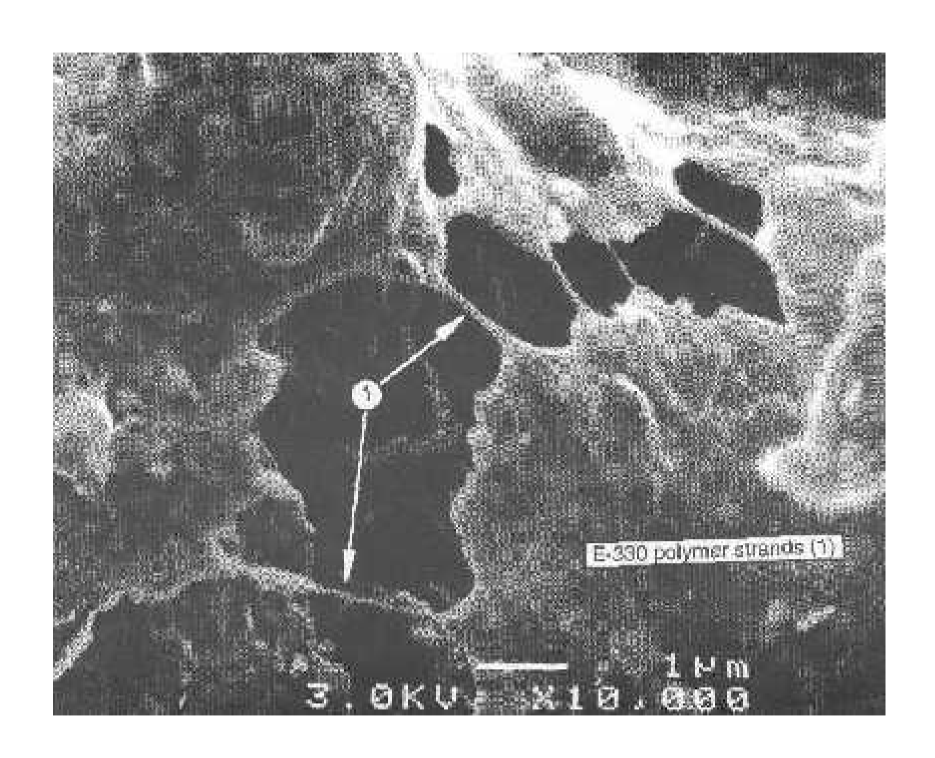
للمسامية الذي ينقص من نفاذية الحجارة للماء، وفي نفس الوقت يحافظ على نفاذية البخار من وإلى المادة الحجرية.[1]

هناك عدة معايير تؤخذ بعين الإعتبار عند إختيار المادة المقوية، فعلى سبيل المثال عازلية المادة المستعملة للرطوبة، ولكن ليست كل المواد المقوية بالضرورة مادة عازلة للرطوبة (Hydrofuge)، يمكن ضمان هذه الخاصية بإستخدام مواد للحماية تطبق على سطح الحجارة بعد العلاج، إن التوزيع الجيد والمتجانس للمحلول المطبق وعدم تشكل مواد ثانوية خطرة بعد تفاعله تعتبر أيضا معايير أساسية عند إختيار المادة المقوية، أما في ما يخص الإرجاعية (Réversibilité) فيمكن إعتبارها إلى حد ما معيار نظري ونسبي، فعند تغلغل أي مادة في الشبكة المسامية للحجارة وإلتحامها مع مكوناتها الفلزية فإنه من الصعب إزالتها بشكل نهائي.[2]

من بين الإشكاليات الأساسية لعملية التقوية هي كمية المادة المقوية اللازمة لضمان تقوية جيدة، يرى بعض الباحثين أن الطريقة المثلى لعملية التقوية تكمن في وصل العناصر الفاقدة للتماسك عن طريق جسور عادة لا يتعدى أبعادها 50- 80 μm (الصورة رقم:28)، فعند تطبيق كمية قليلة من المادة المقوية تترتب على ذلك تقوية ضعيفة (Sous-consolidation) لا تؤدي إلى العلاج المناسب، وفي المقابل يترتب عن تغلغل كمية كبيرة من المقوي تقوية مضاعفة (Sur-consolidation) حيث يكون سد معظم مسامات الأجزاء المعالجة ما يشكل خطرا، لكن بالرغم من ذلك يبقى مبدأ التطبيق بالتشبع (à refus) الأكثر تطبيقا في إنتظار دراسات وأبحاث حديثة تعالج إشكالية التغلغل المتجانس للمقوي في الشبكة المسامية للحجارة المعالجة.[3]

---

[1] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.35
[2] Ibid., p.36
[3] Ibid.



الصورة رقم 28: صورة مجهرية (MEB) تبين جسور من المادة المقوية تربط عناصر الحجارة المعالجة
(Hartzler (R) 1996)

II- تاريخ أعمال التقوية:

لعل من أولى التطبيقات على الحجارة في إطار عمليات التقوية كانت خلال القرن 16م، وهذا بوجود أدلة وشواهد مادية أثبتتها بعض الدراسات، لكن الأكيد أن هذه العملية كانت تستعمل منذ فترات قديمة تقوم على تشريب الحجارة بزيت الكتان الساخن، وأظهرت هذه الطريقة بعض النتائج الحسنة لكن من بين سلبيات تطبيق هذه المادة تكمن في تغير لون الحجارة المعالجة في غضون سنوات قليلة بالإضافة إلى التغلغل الضعيف للزيت،[1] كما أن هذا الأخير يشكل مادة مغذية للعديد من الكائنات الحية التي يمكنها أن تسبب في تلف إضافي للحجارة.

---

[1] Torraca (G), « *Philosophie générale de la conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, textes des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazarreni (L) & Pieper (R), pp.187-210

منذ منتصف القرن التاسع عشر إستعملت العديد من المواد الذي كان الهدف منها تقوية الحجارة ومواد أخرى كالأخشاب والفخار والملاط، وفيما يلي سنحاول عرض أهم المواد وطرق تطبيقها والباحثين الذين وضعوها وفق تسلسل زمني:

- **1850** إستعمل الباحث الألماني "فيش" (Fuchs) السيليكات على شكل سائل لتقوية وحماية الحجارة الفاقدة لخصائصها الميكانيكية، تتشكل المادة الفعالة وهي السيليس المميّه (Silice hydratée) وفق المعادلة الكيميائية التالية: [1]

$$Na_2O.\ x\ SiO.\ y\ H_2O + CO_2 \rightarrow x\ SiO_2.\ yH_2O + Na_2CO_3$$

سيليكات الصوديوم   سيليس مميه

- **1861** كان أول استعمال لسيليكات الإيثيل (Silicates d'éthyle) في مجال صيانة الحجارة من طرف بروفيسور الكيمياء العضوية الإنجليزي "هوفمان" (Hoffman).[2]
- **1862** سجل الباحث "شيرش" على براءة إستعمال محلول هيدروكسيد الباريوم (Hydroxyde de barium) الذي كان يسمى الباريت (Barite) لحماية وتقوية الحجارة.[3]
- **1890** كانت بداية إستعمال الفليوسيليكات (Fluosilicates)، وتعتمد هذه الطريقة التي جربها أول مرة الباحث "كيسلر" (Kessler) على تشريب الحجارة المتلفة في ماء الكاولين (Kaolin) وهو عبارة عن غضار أبيض اللون ثم وضعها في حمض الفليورهيدريك (Acide fluorhydrique) (HF)، هذه الطريقة إستعملت لعدة سنوات إلا أنه بعد مرور مدة زمنية يظهر تلف تحت الطبقة السطحية قد يؤدي إلى نتائج وخيمة،[4] طبقت هذه المادة مباشرة بعدما تمكن الباحثون من إنتاجها إصطناعيا، فبالإضافة لمفعول التقوية فإن الفليوسيليكات لها تأثير سام على الكائنات الحية ما يساهم على

---

[1]Ozturk (I), *Alkoxysilanes consolidation of stone and earthen building materials*, a thesis in The Graduate Program in Historic Preservation, faculties of the University of Pennsylvania 1992, p.05

[2] Ibid., p.10

[3] Lewin (S.Z), *Substances synthétiques*…, Op.Cit., p.225-234

[4] Ozturk (I), Op.Cit., p.06

وقاية الحجارة من التلف البيولوجي، تتشكل المادة المقوية (السيليس المميّه) وفق المعادلة الكيميائية التالية[1] :

$$2CaCO_3 + MgSiF_6 + nH_2O \rightarrow 2CaF + MgF_2 + Si_2.H_2O$$

كالسيت فليوسيليكات فليورين سيليس مميه

- **1907** تم إعادة تطبيق محلول هيدروكسيد الباريوم على العديد من الحجارة وأيضا على لوحات من الإفريسك، وقال بعض الباحثين حينها: " لم نتلق أي فشل عند تطبيق الباريت على الحجارة الكلسية".[2]

- **1924** سجلت براءة لطريقة تقوية تقوم على تشريب الحجارة بناتج تفاعل الكحول الإيثيلي مع رباعي كلورير الصوديوم (Tétrachlorure de Sodium)، وسمي هذا المنتج الجديد بالسليكون (Silicone).[3]

- **1926** تم تسجيل براءة إستعمال سيليكات الإيثيل من طرف الباحث "لوري" (Laurie).[4]

بعد الحرب العالمية الثانية أجريت العديد من عمليات الترميم جراء ما خلفته الحروب من دمار وتخريب للتراث، ورافقت هذه العمليات دراسات وإختبارات تقنية وعلمية أعطت نتائج مشجعة، حيث تمكن الباحثون من اختبار وتطبيق البحوث النظرية، من خلال الدراسات التي أجريت آنذاك تبين ما يلي:[5]

- تسارع وتيرة التلف يرتبط طرديا مع وجود الأملاح القابلة للذوبان في الشبكة المسامية للحجارة
- يزيد التلف بشكل كبير سواء في الوسط الحمضي أو القاعدي
- ترتبط سرعة التلف طرديا بدرجة إستطراب الأملاح الموجودة في الحجارة
- كمية الرطوبة الموجودة في الشبكة المسامية مرتبطة أساسا بالرطوبة النسبية للجو

[1]Torraca (G), *Lectures on* materials…, Op.Cit., p.177
[2] Lewin (S.Z), Op.Cit., p.225
[3] Torraca (G), « Philosophie générale…, Op.Cit., pp.187-210
[4] Ozturk (I), Op.Cit., p54.
[5] Torraca (G), « Philosophie générale…, Op.C.it, pp.187-210

كما كانت فترة ما بعد العالمية الثانية البداية الفعلية لإستعمال الراتنجات الإصطناعية (Résines synthétiques)، بداية بالايبوكسيد (Epoxydes) وخلات البوليفينيل (Acétates de polyvinyle)، وبعدها جرّب الأكريليك (Acryliques) والسيلان (Silane) والسليكون.

- **1947** رد الباحث "أركيل" على من دافع على إستعمال كربونات الباريوم بالقول: " إن العديد من العلاجات الكيميائية لاقت نجاحا باهرا، ولكن تبين أنها غير فعالة بمرور الزمن كما هوالحال بالنسبة للباريت".[1]
- **1959** طبق أورثوسيليكات الإيثيل الرباعي (Orthosilicate de tétraéthyle) على صعيد واسع فقد أعطى نتائجا إيجابية، ولكن بعد عدة سنوات ظهرت عدم فعاليتها، كما أجريت أبحاث ودراسات نصحت بعدم إستعمال هذه المادة المقوية.[2]
- **1966** طبقة لأول مرة طريقة "فورونتين" (Forentine)، والتي تعتمد على تطبيق هيدروكسيد الباريوم $Ba(OH)_2$ وذلك وفق الطريقة التالية:[3]

$$Ba(OH)_2 + CaSO_4.2H_2O \rightarrow BaSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + BaCO_3$$

هيدروكسيد الباريوم	الجبس	باريتين	هيدروكسيد الكاسيوم	الكالسيت	كاربونات الباريوم

في المرحلة الأولى يتفاعل هيدروكسيد الباريوم مع الجبس معطيا البارتين (Barytine)، وهو عبارة عن كبريتات الباريوم (Sulfates de baryum) غير القابل للذوبان، وكمرحلة ثانية يتفاعل كبريتات الباريوم مع هيدروكسيد الكلسيوم (Hydroxyde de calcium) مشكلا كربونات الباريوم (Carbonates de baryum) قليل الذوبان وهي المادة المقوية، من بين أهم مساوئ هذه الطريقة هي إمكانية ظهور بقع بيضاء على الحجارة المعالجة.[4]

---

[1] Torraca (G), « Philosophie générale…, Op.Cit., pp.187-210
[2] Ibid.
[3] Ibid.
[4] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.38

- **1966** قام "لوين" (Lewin) بإقتراح إعادة إستعمال محلول هيدروكسيد الباريوم بعد مراجعة الصيغة المطبقة، الإقتراح الأول لـ "لوين" كان إستعمال محلول متجانس من هيدروكسيد الباريوم ومادة اليوريا (Urée)، يطبق المزيج عبر طريقة الغمر.[1]

- **1967** قامت مخابر ألمانية بدراسات حول تطبيق مادة ألكوكسي سيلان (Alkoxysilane) كمادة مقوية، وأعطت هذه الدراسات نتائج إيجابية ساهمت في إنتشار تطبيق هذه المادة خاصة لعلاج الحجارة الرملية.[2]

- **1968** كان أول إستعمال لراتنج أكريليكي بنطاق واسع وكان ذلك أثناء ترميم كاتدرائية "سيين" (Sienne) بإيطاليا.

- **1971** أعاد "لوين" تعديل الصيغة السابقة بإضافة مادة الغليسيرين (Glycérine) لمحلول هيدروكسيد الباريوم بإعتبار الغليسيرين مذيب بطيء التبخر وهذا لضمان تغلغل أعمق للمادة المقوية.[3]

- **1972** سوّقت لأول مرة مادة سيليكات الإيثيل.[4]

- **1983** قامت عدة مخابر بتجريب مواد مقوية على شكل مونومير (Monomère) من أجل تحسين تغلغلها، تم تسجيل أول براءة بالنسبة لهذا النوع من المقويات من طرف مجموعة ألمانية.[5]

III- طرق ومناهج تطبيق المواد المقوية:

لا ترتبط فعالية عملية التقوية بالخصائص الفيزيوكيميائية للمادة المقوية والحجارة المعالجة فقط، بل ترتبط أيضا إرتباطا وثيقا بطريقة تطبيق العلاج، كل هذه العوامل متداخلة إضافة للعوامل المناخية المحيطة كالحرارة والرطوبة النسبية تحدّد نجاعة وفعالية العملية، لم تول الدراسات والأبحاث أهمية كبيرة لمدى تأثير طرق تطبيق المادة المقوية على فعالية العلاج، حيث أن معظم الأبحاث ركزت على المادة المقوية في حد ذاتها وتفاعلها الفيزيوكيميائي في الشبكة المسامية للحجارة، بعد إتخاذ

[1] Ozturk (I), Op.Cit., p.09
[2] Ibid.
[3] Lewin (S.Z), «*Substances synthétiques*…, Op.Cit, pp.225-234
[4] Ibid.
[5] Ibid.

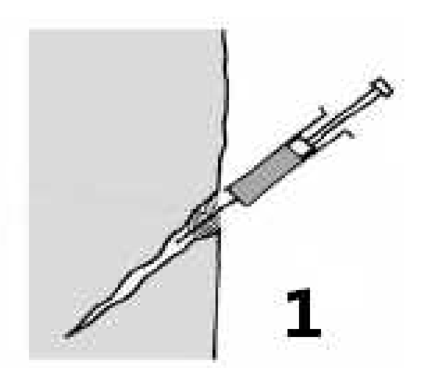
قرار إجراء عملية التقوية يقوم المرمم بإختيار طريقة تطبيق المادة المقوية إنطلاقا من عدة معطيات حول خصائص الحجارة وهندسة مساميتها وكذا طبيعة المادة المقوية، تستعمل عدة طرق بسيطة هي:

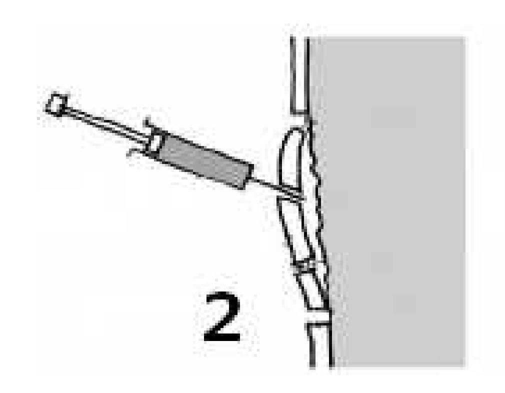
- تطبق ضمادات على سطح الحجارة بعد غمرها بالمادة المقوية بشكل مستمر
- يطبق المحلول المقوي بإستعمال فرشاة
- ترش المادة المقوية على سطح الحجارة حتى التشبّع
- يحقن المقوي لملئ في الفراغات والشقوق الدقيقة
- تغمر القطع الأثرية ذات الأبعاد الصغيرة في المادة المقوية

إهتم الكثير من الباحثين بكيفية تطبيق المواد المقوية وحاولوا وضع طرق ومناهج جديدة تكون أكثر فعالية، يعتبر عمق تغلغل المقويات وتجانس إنتشارها عاملان أساسيان في نجاح عملية التقوية، لذا فإن الحصول على تغلغل أكبر يتم إذا ما زيد في مدة تطبيق المحلول المقوي، أي الزيادة في مدة تلامس المحلول مع سطح الحجارة، إن العمق الذي يمكن الوصول إليه في المخبر لا يمثل في الواقع العمق الذي يمكن الوصول إليه عند تطبيق نفس العلاج في الموقع، خاصة فيما يخص واجهات البناءات والجدران، من بين أهم الطرق والمناهج المستعملة في تطبيق المواد المقوية هي:[1]

ـ تتم عملية تطبيق المادة المقوية عن طريق حقنها في شقوق وفجوات الأجزاء الهشة من الحجارة، وفي حالة عدم وجود مثل هذه المنافذ يتم إحداث ثقوب رفيعة، وعند حقن المحلول يجب إزالة الكمية الإضافية التي تظهر على السطح بواسطة قطعة مبللة بمذيب كالأسيتون. (الصورة رقم:29) (الشكل رقم:5)

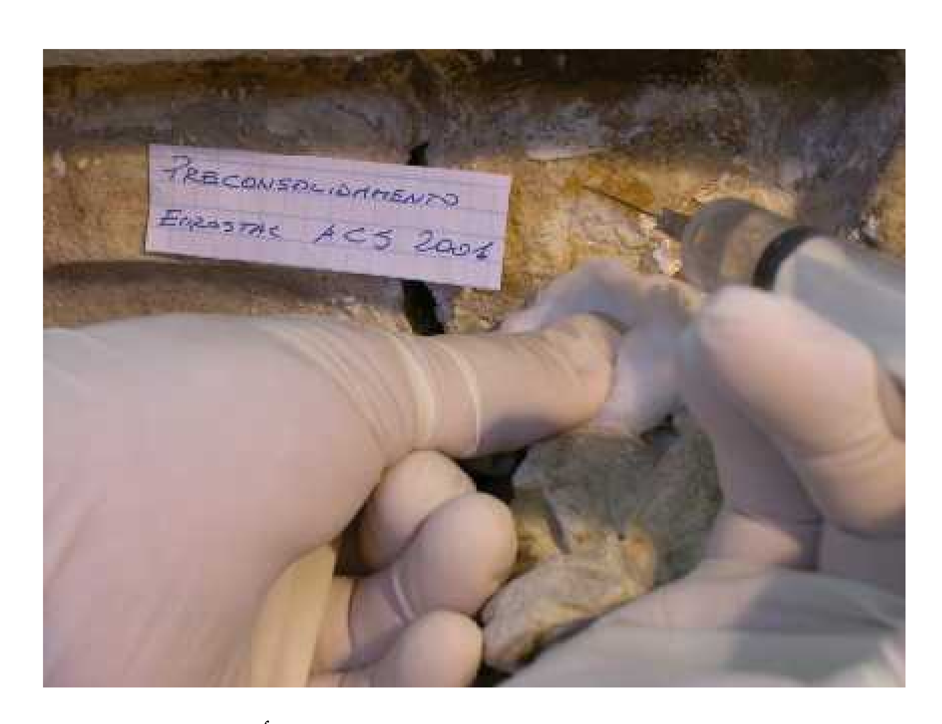
[1] Pinto (F) & Rodrigues (D), «*Stone consolidation: The role of treatment procedure***s**», in Journal of Cultural Heritage 9 (2008), pp.38-53





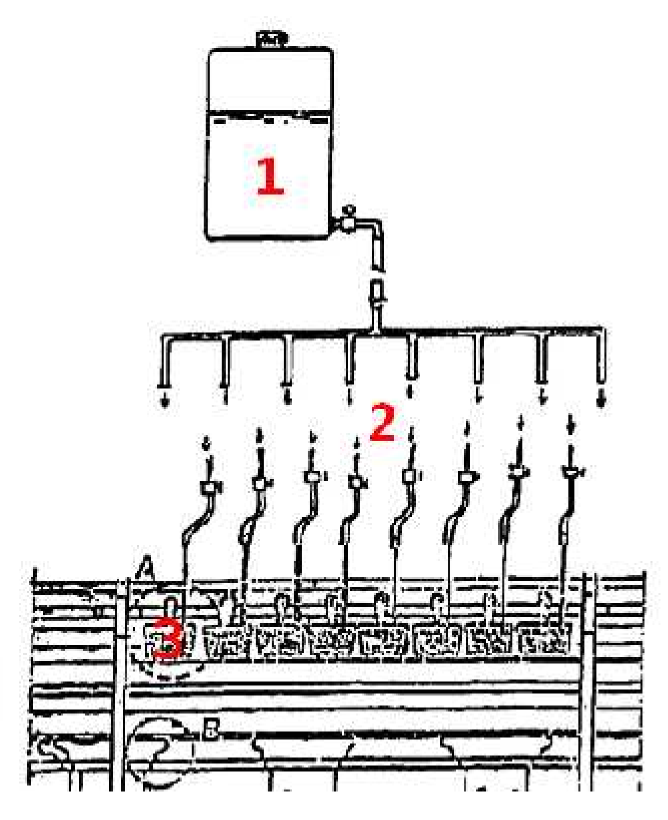
الشكل رقم 5: رسم توضيحي لعملية التقوية بواسطة الحقن.

1 حقن الشقوق. 2 حقن الطبقة المنفصلة



الصورة رقم 29: عملية حقن مادة مقوية في رخام أصيب بتفتت حبيبي (بلعيبود ب، 2008)

- طريقة أخرى تقوم على وضع فرش أو ضمادات على سطح الحجارة، يتم تبليلها بصفة مستمرة بالمحلول المقوي بإستخدام أنابيب صغيرة موصولة بخزّان صغير، وللحد من تبخّر المحلول يتم تغطية الفرش أو الضمادات بورقة من البلاستيك أو الألمنيوم. (الشكل رقم:6)



الشكل رقم 6: تطبيق مقوي بواسطة فرش (3) موصولة بأنابيب (2) موصولة بخزان (1)
(Tabasso (L) 1982)

- قام الباحث دوماسلوسكي (Domaslowski) سنة 1969 بتجريب نظام يقوم على إستعمال جيوب تهدف لإبقاء المادة المقوية في إتصال مع سطح الحجارة لمدة أطول.
- في سنة 1988 قام ميروسكي (Mirowski) بوضع المادة المقوية في قارورات بحيث يتم تطبيقها بكميات منتظمة في عدة نقاط من سطح الحجارة.
- سنة 1993 طور الباحث شونبرود (Schoonbrood) تقنية تقوم على تطبيق المادة المقوية في ضغط شعيري منخفض يزيد من إمكانية الإمتصاص.
- غمر القطعة الحجرية في المحلول المقوي حيث تتم عملية التغلغل من خلال الخاصية الشعيرية، حيث توضع القطعة في إناء ويتم رفع مستوى المحلول تدريجيا حتى الغمر الكلي، وتكون مدة العملية مرتبطة بمسامية الحجارة وبالخصائص الفيزيوكيميائية للمحلول.

- إقترح الباحث " وير" (Wihr) نظام رش دائم، بحيث يعاد إستغلال المحلول الذي لم يتغلغل، تم الحصول على تغلغل يقدر ب 0.5 إلى 5 سم/سا حسب مسامية الحجارة.

- طبق "نوفرمال" (Nofarmale) مركب أعطى نتائج جيدة على حجارة رملية شديدة التلف، حيث تمت عملية التقوية بإستعمال بمركب مشكل من السيلكون والأكريليك عن طريق عملية الرش.

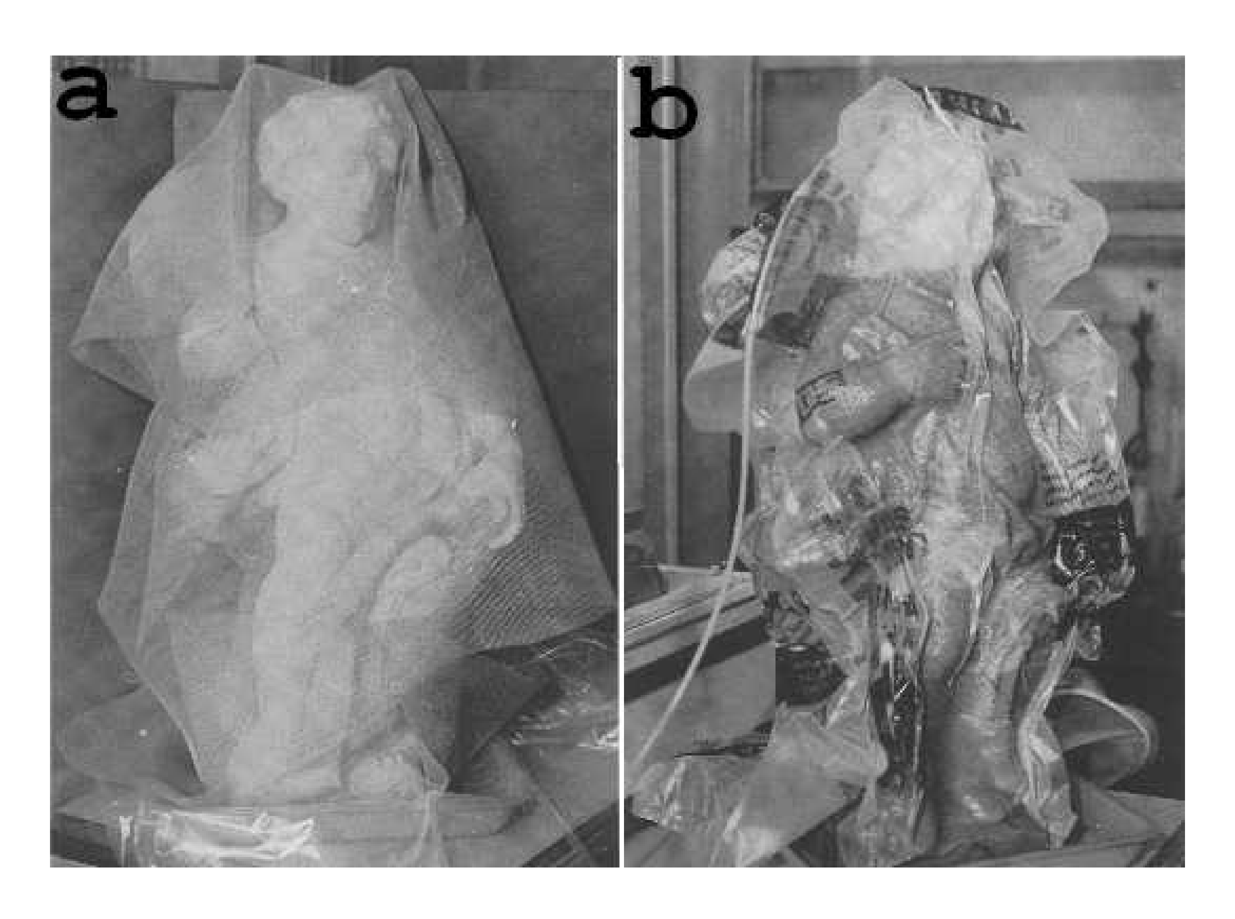
- إقترح برادلي (Bradley) تطبيق المحلول المقوي على شكل قطيرات بواسطة أنبوبة تقطير (Pipette) حتى التشبّع (الصورة رقم:30)



الصورة رقم 30: تطبيق المادة المقوية عن طريق التشبع بإستعمال أنبوبة تقطير (Delgado Rodrigues (J) 2002)

للرفع من درجة التغلغل يمكن إجراء عملية التقوية في وسط مفرغ من الهواء، حيث يتم وضع القطعة الحجرية في غرفة موصولة بمضخة ماصة تقوم بتفريغ الغرفة من الهواء حتى يصل الضغط إلى بضعة مليمترات زئبقية، تحت هذا الضغط تفرغ الشبكة المسامية للحجارة من الهواء والبخار الموجود بداخلها، بعدها يتم وصل الغرفة تدريجيا بإناء يحتوي على محلول مقوي، وبسبب التباين في الضغط يتم إمتصاص

المحلول ببطء إلى داخل الغرفة حيث يستبدل الهواء المنزوع من المسامات بالمادة المقوية، وفي النهاية يعاد الضغط الطبيعي بصفة تدريجية.[1] طبق الباحث "كولتيك" (Kotlik) نفس المبدأ فقام بلف القطعة المعالجة بمادة البولي إيثيلان وتم تفريغ الهواء مما أدى الى إلتصاقه بالتمثال (الصورة رقم:31) ثم تم تطبيق المادة المقوية تدريجيا عبر نفس الأنبوب الذي تم بواسطته إفراغ الهواء.[2]



الصورة رقم 31: (a) لف التمثال بمادة البولي إيثيلان (b) التصاق البولي إيثيلان بسطح التمثال بسبب إفراغ الهواءتحضيرا لتطبيق المقوي

(Kotlik (P) 1998)

[1] Tobasso (L), Op.Cit., pp.211-224

[2] Kotlik (P), «*Impregnation under low pressure*», in Studies in Conservation 43 (1998), pp.42-48

IV- أنواع المقويات:

إن عزوف المنتجين الصناعيين عن القيام بالأبحاث المتعلقة بمواد لتقوية الحجارة الأثرية أدى لعدم الوصول إلى مقويات ذات فعالية عالية وبدون تأثيرات جانبية، مقارنة مع مجالات صناعية أخرى يمكن القول أن مجال الصيانة والترميم يبقي نوعا ما ثانويا، لأن أغلب المواد الكيميائية المستعملة في مجال صيانة التراث المادي بصفة عامة غالبا ما تكون موجهة إلى مجالات أخرى، لكن مستقبلا يمكن للمخابر والمجموعات الصناعية في مجال الكيمياء أن تلعب دورا حاسما في تطوير وتحسين مواد إصطناعية موجهة لصيانة الحجارة خاصة فيما يتعلق بمواد التقوية.

تهدف عملية التقوية لوصل عناصر الحجارة التي فقدت تماسكها، بحيث تحلّ المواد المقوية محلّ الاسمنت الذي يضمن تماسك الحجارة، وتتصل المواد المقوية بسطح العناصر الفلزية بواسطة عدة أنواع من الروابط الكيميائية وهذا بإختلاف طبيعة سطح المادة الحجرية الذي إما أن يكون عازل للرطوبة أو جاذب للرطوبة، لأن إنسجام وقوة ربط أي مادة مقوية تتلخص في الرابطة الكيميائية التي تكون بين المقوي وسطح العناصر الحجرية، ومن أهم الروابط الكيميائية التي تضمن الإلتحام بين المادة المقوية والحجارة نجد:[1]

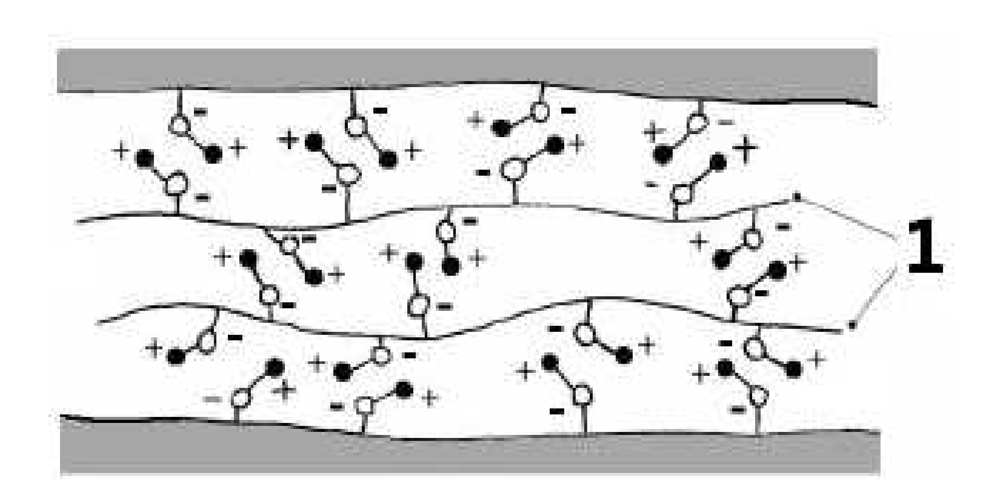
- الرابطة الجزيئية "فان ديرفال":

تتميز المقويات التي ترتبط برابطة "فان دير فال" (van der waals) بجزيئات طويلة ضعيفة القطبية وقابلة للذوبان في مذيبات ضعيفة القطبية، وتعتبر الروابط التي تتصل بها مع سطح الحجارة (سواء كان يكون عازل للرطوبة أو جاذب للرطوبة) بواسطة تجاذب كهربائي وهي في العموم قوى ضعيفة لكن طول الجزيئات وتراصّها الكبير ينتج قوة شد معتبرة.

[1] Torraca (G), *Lectures on material*…, Op.Cit., pp.170-172

- **الرابطة القطبية:**

المواد التي تنتمي إلى هذه العائلة هي عبارة بوليمرات مشكّلة من مجموعات قطبية ترتبط فيما بينها نتيجة الجذب الكهربائي بين الجزيئات ثنائية القطب (الشكل رقم:8) ، فالرغم من أن هذا النوع من الروابط الجزيئية ضعيفة بحوالي 10 مرات مقارنة بالروابط الكيميائية الإبتدائية إلا أنها تضمن إعادة تماسك عناصر الحجارة، ومن بين أهم المواد التي تنتمي لهذه الفئة نجد البولي فينيل والبولي أكريليك التي تطبق مذابة على شكل محاليل، ولكي يتم الإلتحام الجيد بين المادة المقوية التي تنتمي إلى هذه الفئة والعناصر الفاقدة للتماسك يجب وجود عددا كافيا من المجموعات القطبية على سطح الحجارة المعالجة، ومنه فإن هذه المواد ليس لديها فعالية بالنسبة للسطح الطارد للرطوبة غير القطبي .



الشكل رقم 8: تمثيل لبوليمرات مرتبط فيما بينها نتيجة الجذب الكهربائي بين الجزيئات ثنائية القطب

(Toracca (G) 2009)

- **الروابط الكيميائية الإبتدائية:**

ترتبط بعض مواد التقوية بواسطة روابط كيميائية مع مجموعات هيدروكسيل (OH) المشكلة للسطح جاذب الرطوبة، من بين أهم هذه المواد نجد الإيبوكسيد التي تتميّز بمقاومة شد كبيرة (في حدود 5 إلى10MPa) لذا تعتبر هذه المواد من الرانتجات

البنوية، يروّج في الأسواق العديد من المواد الكيميائية بأسماء تجارية مختلفة موجهة لتقوية مواد البناء بشكل عام، تستعمل بعض هذه المواد في تقوية الحجارة الأثرية.

تقسّم المواد المقوية التي تستعمل لعلاج الحجارة الأثرية حسب طبيعتها الكيميائية إلى مقويات غير عضوية وأخرى عضوية:

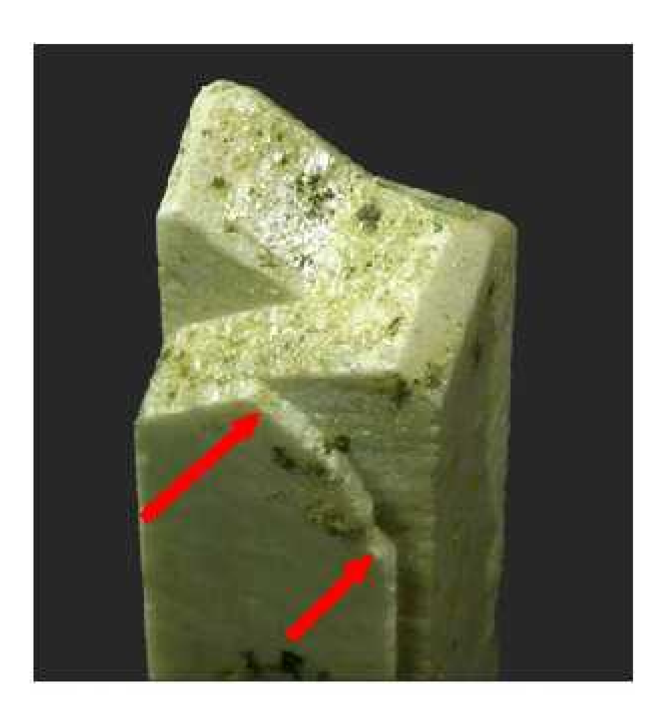
1-IV المقويات غير العضوية:

تساعد المقويات غير العضوية على إعادة تماسك الحجارة من خلال ترسّب جزيئاتها التي تربط بين العناصر المفككة، إن التركيبة الكيميائية والفلزية للمقويات والحجارة المعالجة غالبا ما تكون متقاربة، هذا ما يزيد من فعالية هذه المواد التي يمكنها إعادة ربط العناصر الفاقدة للتماسك، فيتشكل كربونات الصوديوم أو كربونات الباريوم إذا استعمل الجير أو الباريت، ويتشكل السيليس المميّه إذا كانت المقويات عبارة عن سيليكات أو فليوسيليكات، أما في حالة إستعمال مادة مقوية مشكّلة من ألومينات البوتاسيوم (Aluminates de potassium) فيتشكل الألومين (Alumine) كمادة رابطة.[1]

يمكن إستغلال بعض التفاعلات الكيميائية لترسيب مواد فلزية داخل الحجارة لكي تلعب دور المادة الرابطة، ومن المستحسن أن تكون هذه المادة من نفس طبيعة المادة الرابطة الأصلية للحجارة المعالجة، وتتحكم في هذه العملية آليتين هما:[2]

- إبيتاكسي (Epitaxie)، وهي ظاهرة توضّع بلورات حديثة التكوين على بلورات أصلية، ولا تحدث هذه الظاهر الكيميائية إلا في حالة تقارب الخصائص العقدية (Caractéristiques de la maille) للبلورتين وتشابه التركيبة الكيميائية للمادة المقوية والحجارة، مثل التلائم الجيد لكربونات الكالسيوم مع بلورات الكالسيت التي تشكل الحجارة الكلسية والرخام. (الصورة رقم:32)

[1] Torraca (G), « *Philosophie générale*…, Op.Cit., pp.187-210
[2] Ibid.



الصورة رقم 32: صورة مكبرة لتشكّل طبقة على بلورة الكالسيت بفعل ظاهرة إبيتاكسي (Epitaxie)

(Daniele (V) 2010)

- الإرتباط الكيميائي للمادة المتشكلة مع سطح البلورات، ويظهر هذا التفاعل على شكل إلتحام المادة المقوية ببنية الحجارة، ومثال على ذلك تفاعل حمض السيلسيك الناتج عن عدة سيليكات مع مجموعة الهيدروكسيل (Hydroxyle) الموجودة على سطح العديد من الفلزات.

تتميّز المقويات غير العضوية بإستقرارها حيث أنها تحافظ على خصائصها لمدة طويلة، ولها مقاومة جيدة للتأكسد والضوء، لكن بالمقابل لها العديد من المساوئ، من أهمها:[1]

- تغلغل سيئ في الشبكة المسامية للحجارة.
- تغيّر في لون الحجارة بعد ترسّب المواد الفلزية.
- تشكّل أملاح قابلة للذوبان كنواتج ثانوية للتفاعل، مثل سيليكات الصوديوم والبوتاسيوم.
- عدم تحسين الخصائص الميكانيكية للحجارة المعالجة.

[1] Torraca (G), *Matériaux poreux*…, Op.Cit., p.87

تعتبر المقويات الفلزية من أولى المواد التي إستعملت في مجال تقوية الحجارة الأثرية وهذا راجع لتوفّرها وقلة تكلفتها ومن بين المقويات غير العضوية التي أعطت نتائج إيجابية نجد:

1-1-IV هيدروكسيد الكالسيوم:

يكمن المفعول المقوي لهيدروكسيد الكالسيوم أو ما يعرف بماء الجير بتشكّل كربونات الكالسيوم بتفاعله مع الغاز الكربوني وفق المعادلة التالية:[1]

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

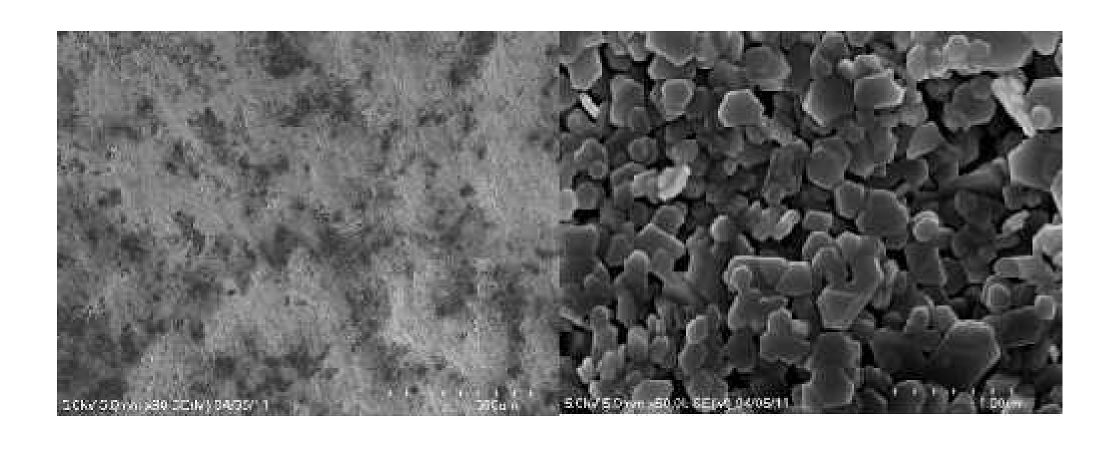
إن إستعمال مواد هيدروكسيد الكالسيوم على شكل غروي (Colloïdal) يعطي إمكانية أكبر لتغلغل متجانس وعميق، فالعناصر ذات أبعاد ما بين 50- 250 نم (1 نانومتر= 10^{-9} متر) تمكّنها من التغلغل في المسامات الدقيقة، يستعمل كحول الإيثانول أو ن- بروبانول (n-propanol) أو إيزوبروبانول (Isopropanol) كمذيب، ويقتصر إستعمال هذا المقوي على الحجارة الكلسية والرخام، فعند تطبيق هذه المادة وتغلغلها داخل الحجارة، يتبخر الكحول ويتحوّل هيدروكسيد الكالسيوم الى كربونات الكالسيوم وذلك بفعل ثاني أكسيد الكربون، (الصورة رقم:33،34) ولعناصر النانو عدة إيجابيات:[2]

- إمكانية التغلغل العميق في المناطق المتلفة بسبب الأبعاد الدقيقة لعناصرها
- تفاعل سريع وفعال للمادة المقوية (عملية الكربنة)
- نقاوة المادة المقوية

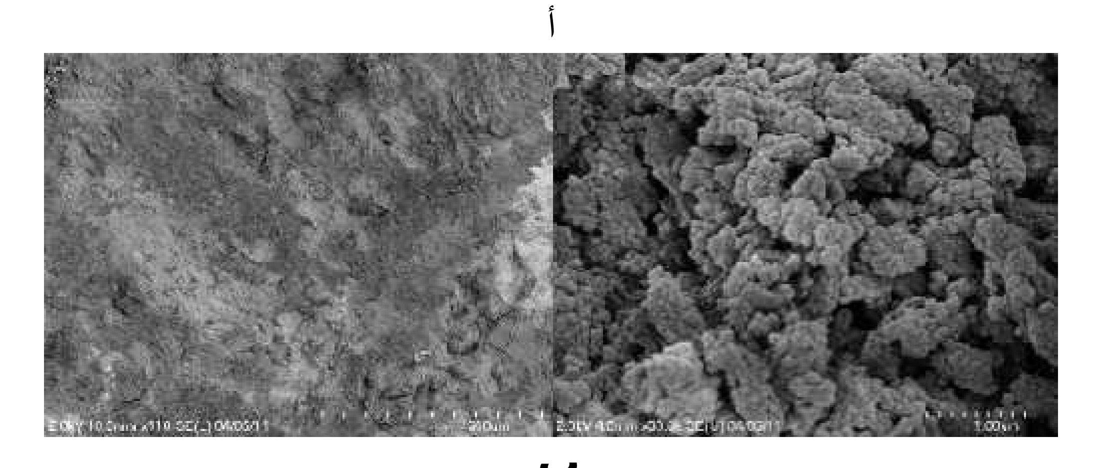
---

[1] Lazzarini (L) & Tabasso (L), Op.Cit., p.184

[2] De Muynck (W) & al, «*Microbial carbonate precipitation in construction materials*», in Ecological Engineering 36 (2010), pp.118–136



أ



ب

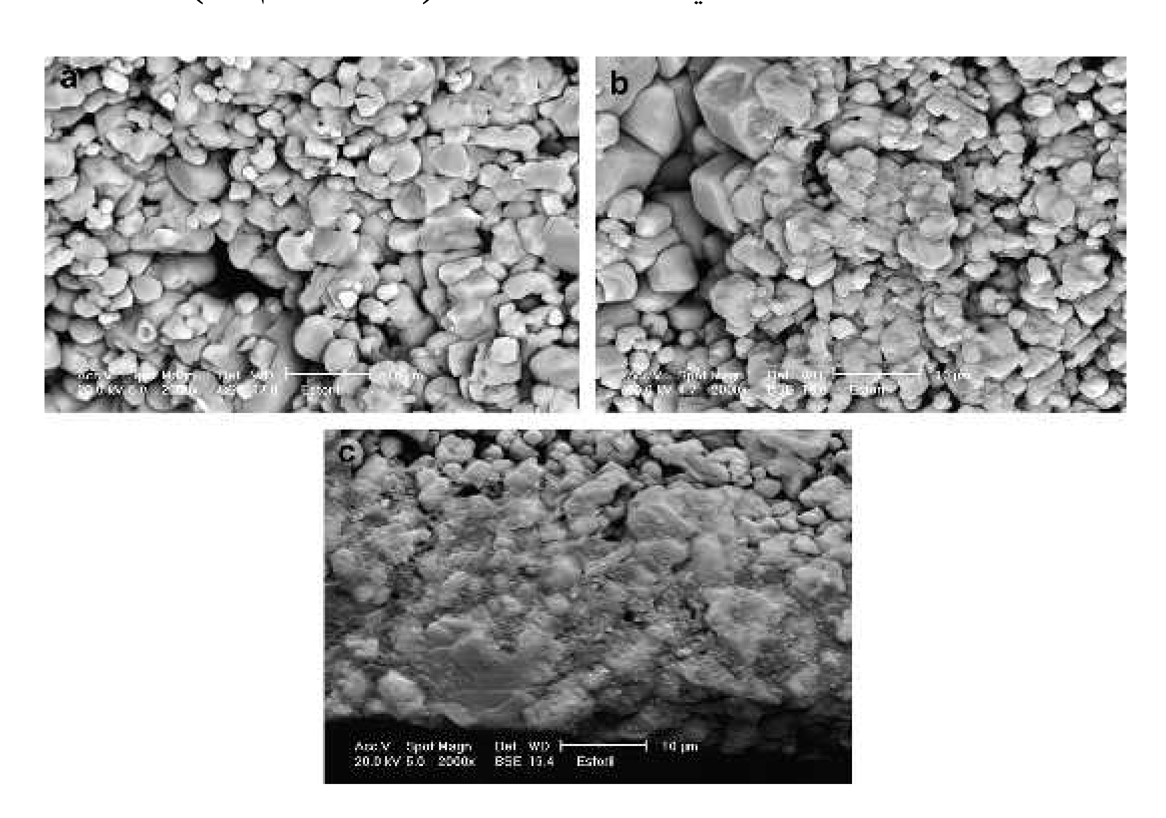
الصورة رقم 33، 34: صور مجهر الكتروني (MEB) لحجارة عينة معالجة بالنانو هيدروكسيد الكالسيوم أ/ تغلغل جزيئات النانو وترسّبها في الشبكة المسامية للحجارة ب/ تحوّل هيدروسيد الكالسيوم إلى كربونات الكالسيوم بفعل ثاني أكسيد الكربون (Daniele (V) 2010)

إن النانو هيدروكسيد الكالسيوم المستعمل في مجال تقوية الحجارة الأثرية مسوّق تحت الإسم التجاري "كالوسيل" (®CaLoSiL)، وهي عبارة عن عناصر دقيقة جدا منتشرة في الكحول أبعادها في حدود 150نم، بعد تبخّر الكحول تتشكل أغشية كثيفة من هيدروكسيد الكالسيوم تتحوّل إلى كربونات الكالسيوم بفعل ثاني أكسيد الكاربون الموجود في الهواء ونسبة معينة من الرطوبة، ولا يتم التصلب الكلي إلى بعد عدة أيام أو أسابيع، كما أن رش الحجارة بالماء قبل العملية قد يسرّع التفاعل، في بعض الحالات تظهر ترسّبات بيضاء على سطح الحجارة ناتجة عن تشكل كربونات الكالسيوم بسبب إنتقال عناصر من هيدروكسيد الكالسيوم مع حركة بخار الكحول

وترسّبها على السطح وتحوّلها إلى كربونات الكالسيوم بفعل ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء، ولتفادي مثل هذه الظاهرة من الأفضل تتبّع الخطوات التالية:[1]

- يتم تطبيق المادة بتركيز منخفض، وتكون الزيادة في التركيز بصفة تدريجية
- لا تطبق المادة المقوية على الحجارة التي تحتوي على رطوبة عالية، ويمكن التقليل من كمية الرطوبة من خلال تطبيق مزيج الإيثانول (Ethanol) والماء (1:1).
- تجنب تشبّع الحجارة بالمادة المقوية، وإزالة الكمية الزائدة التي تطفو على السطح

يتبخر الكحول في غضون بضع ساعات، لكن عملية الكلسنة (Calcination) تستمر لعدة أيام وحتى أسابيع بحسب كمية هيدروكسيد المتشكلة وأيضا بحسب عوامل أخرى كالرطوبة النسبية وحركة الهواء في الشبكة المسامية.[2] (الصورة رقم:35)



الصورة رقم 35: صور مجهر الكتروني (MEB) لعينة من الحجارة معالجة بمادة كالوسيل ($CaLoSiL^{®}$) مراحل تقوية (a): الحجارة قبل تطبيق العلاج، (b): تغلغل المادة المقوية، (c): تشكل كربونات الكالسيوم
Daniele (V) 2010

---

[1] Daniele (V) & Taglieri (G), *«Nanolime suspensions applied on natural lithotypes: The influence of concentration and residual water content on carbonatation process and on treatment effectiveness»*, in Journal of Cultural Heritage 11 (2010), pp.102–106
[2] Ibid.

إن بعض الكائنات المجهرية لها القدرة على تشكيل كربونات الكالسيوم على شكل فلز الكالسيت، إستغلت هذه الخاصية في مجال تقوية الحجارة الكلسية خلال توظيف الكربونات المتشكل كمادة رابطة للعناصر الفاقدة للتماسك، ولهذا الغرض إستعملت عدة أنواع من البكتيريا، ويتم تطبق هذا النوع من العلاج من خلال طريقتين:[1]

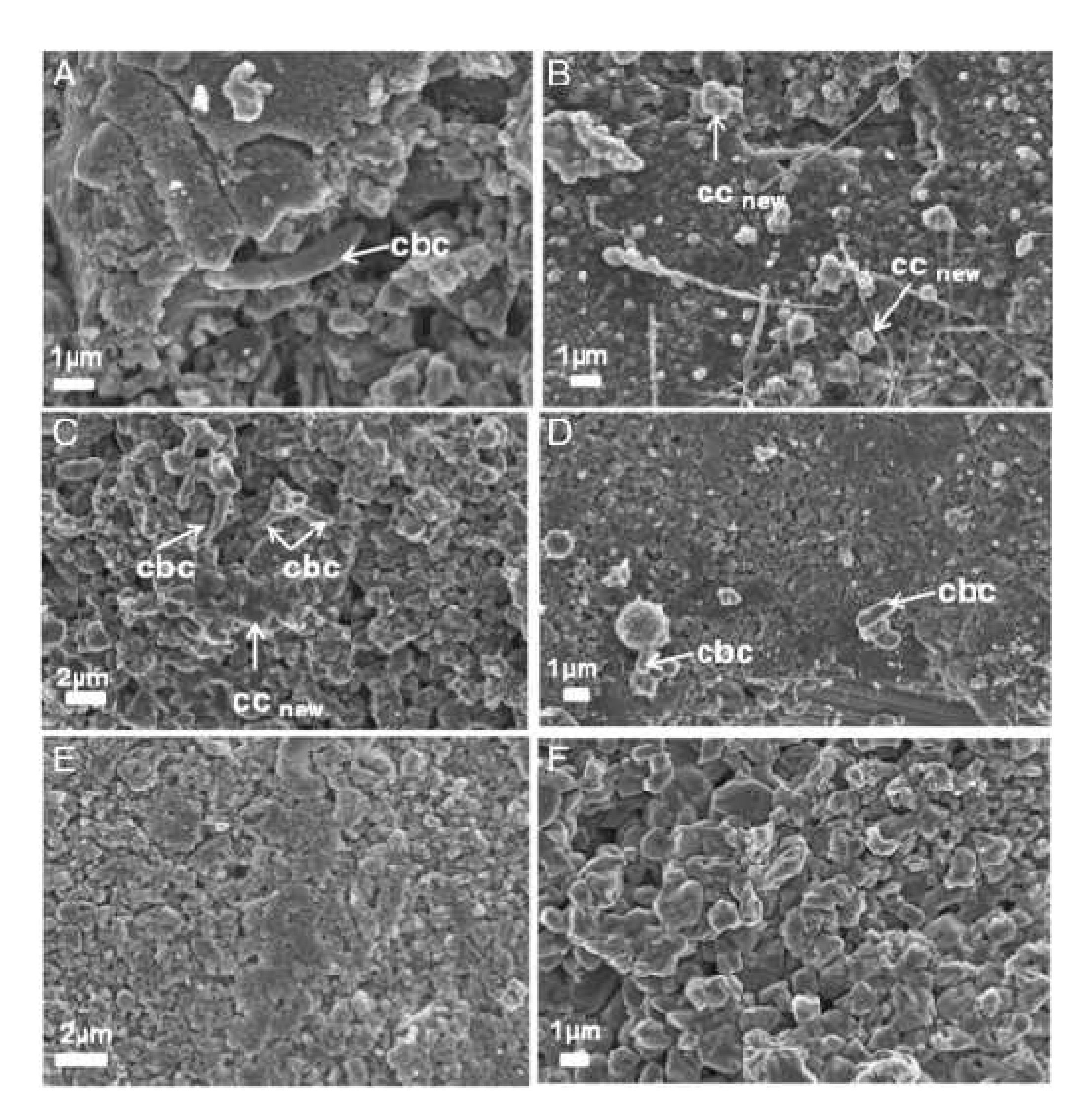
1- إجراء عملية تكاثر البكتيريا المشكلة لكربونات الكالسيوم داخل الحجارة
2- توفير وسط تكاثر لهذا النوع من البكتيريا في الحجارة

جرب الباحث "كاستانيي" (Cartanier) سنة 2000 نوعا من البكتيريا تسمى عصيّات سيروس (Bacillus cereus)، وفي 2003 كما جرّب الباحث "رودريغاز نافارو" (Rodriguez-Navaro) كائنات تعرف بميكوبكتيريا (Mycobactéries) وتوصل إلى النتائج التالية:[2]

- سمك كربونات الكالسيوم المتشكل يتراوح بين 10 - 50 µm
- تلائم المادة الرابطة المتشكل مع الحجارة المعالجة
- تشكل كربونات الكالسيوم حتى عمق 1 ملم بدون تغيير في المسامية

كما جرّبت أيضا العديد من أنواع البكتيريا المنتجة لكربونات الكالسيوم، فقد جرّب الباحث "وارتمان" (Warthmann) بكتيريا مرجعة للكبريت مثل بكتيريا الزرقاء (Cyanobactérie) سنة 2000، أما "باسكار" (Baskar) فأجرى إختبارات على بكتيريا الزائفة (Pseudomonas) التي تنتمي الى شعبة البروتيوبكتيريا، وكان هذا سنة 2006.[3]

[1] Jroundi (F) & al, « *Stone-isolated carbonatogenic bacteria as inoculants in bioconsolidation treatments for historical limestone*», in International Biodeterioration & Biodegradation 62 (2008), pp.352–363
[2] Rodriguez-Navaro (C) & al, "*Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting*", in Chemosphere 68 (2007), pp 1929–1936
[3] De Muynck (W) & al, Op.Cit., pp.118–136



الصورة رقم 36: صور مجهرية (MEB) لعينات حجرية معالجة ببكتيريا منتجة لكربونات الكلسيوم. cbc : البكتيريا. ccnew : فلزات الكالسيت المشكلة من طرف البكتيريا

(De Muynck (W) 2010)

2-1-IV هيدروكسيد الباريوم:

أعيد إستعمال هذه المادة بعد أبحاث "لوين" (Lewin)، وتعتمد هذه الطريقة على تفاعل هيدروكسيد الباريوم مع ثاني أكسيد الكربون مشكلا كربونات الباريوم الذي يعمل على ربط العناصر الحجرية التي فقدت تماسكها وذلك وفق المعادلة التالية:[1]

$$Ba(OH)_2 + CO_2 \rightarrow BaCO_3 + H_2O$$

[1] Lewin (S.Z), « *Substances synthétiques*…, Op.Cit., p.225-234

قد يؤدي نمو بلورات كربونات الباريوم في الشبكة المسامية إلى تلف الحجارة بسبب حجمها الجزئي الكبير مقارنة ببلورات الكالسيت بالإضافة إلى التغلغل السيئ لهذا المقوي، لذا إقترح "لوين" إضافة مادتي اليوريا (Urée) والغليسيرين، وتهدف هذه الصيغة الجديدة لتشكيل كربونات الباريوم كرابط يتغلغل لعمق أكبر، فمادة الغليسيرين تمنع التبخّر السريع خلال فترة تشكل الكربونات، كما أن مادة اليوريا تساهم في تغلغل أعمق كما أنها توفّر مصدرا ثانيا لثاني أكسيد الكربون الضروري لتفاعل الكلسنة.[1]

هذه العملية تتم عبر مرحلتين، الأولى عبارة عن تبادل ما بين أيونات الكالسيوم والباريوم ويتم ذلك على سطح جزيئات كربونات الكالسيوم بوجود هيدروكسيد الباريوم وفق المعادلة التالية:[2]

$$CaCO_3 + Ba(OH)_2 \rightarrow BaCO_3 + Ca(OH)_2$$

خلال المرحلة الثانية تتشكل بلورات كبيرة نوعا ما ومتراصة من كربونات الباريوم التي تقوم بربط العناصر الفلزية للحجارة فيما بينها، يتم تفاعل الكلسنة في المناطق القريبة من السطح بفعل ثاني أكسيد الكاربون الموجود في الهواء، أما في عمق الحجارة فيتم التفاعل بواسطة ثاني أكسيد الكربون المنطلق من تفاعل حلمأة مادة اليوريا التي تضاف إلى المادة المقوية قبل التطبيق وفق المعادلتين:[3]

$$Ba(OH)_2 + CO_2(\text{الهواء}) \rightarrow BaCO_3 + H_2O$$

الكلسنة في السطح

$$Ba(OH)_2 + CO(NH_2)_2 \rightarrow BaCO_3 + 2NH_3$$

الكلسنة في العمق

[1] Ozturk (I), Op.Cit., p.09
[2] Ibid.
[3] Ibid.

IV-2 المقويات العضوية:

إبتداء من النصف الثاني للقرن 20م بدأ إستعمال الراتنجات الإصطناعية في مجال صيانة الحجارة الأثرية، كانت عمليات التقوية مقتصرة على راتنجات الإيبوكسيد وخلات البوليفنيل، بعدها إنتشر إستعمال المقويات العضوية ليشمل أنواعا أخرى خاصة الأكريليكية والسيلانية والسيلكونية، وتكمن إيجابيات المقويات العضوية في مقاومتها الجيدة وعازلتيها للماء وإرجاعيتها النسبية، لكن بعض الراتنجات لديها إرجاعية ضعيفة كالإيبوكسيد، كما يطرح مشكل التغلغل السيئ لأغلب المقويات العضوية بسبب الحجم الكبير لجزيئاتها حيث تتجمع هذه الأخيرة في المناطق القريبة من السطح.[1]

هناك طريقتين لتشكيل بوليمير (Polymères) داخل الحجارة، الطريقة البسيطة تكمن في إذابت البوليمير في مذيب عضوي وتطبيقه على سطح الحجارة، وبعد تبخر المذيب يعاد تشكيل البوليمير من جديد ليأخذ دور المادة الرابطة، لكن هناك عدة مذيبات تقوم بنقل الراتنج نحو السطح أثناء تبخّرها ما يمنع تغلغل عميق ومتجانس، أما طريقة التفاعل الأخرى فتعتمد على تطبيق المادة المقوية على شكل مونومير (Monomère) وتتم عملية البلمرة في المسامات، تمتاز هذه الطريقة بتغلغل جيد كون المونومير أقل لزوجة من البوليمير وبسبب أبعاد جزيئاته الصغيرة.[2]

من أجل تحسين عملية التغلغل إستعملت مقويات مشكلة من مونومير التي تتشكّل من جزيئات صغيرة، فعند تغلغلها في الشبكة المسامية للحجارة تتفاعل من خلال عملية البلمرة فتتصلب مشكلة بوليمير، ويمكن إستعمال محفز لتسريع العملية مثل إستخدام أشعة غاما، لكن هذه العملية لا تخلو من الأخطار بسبب الإرتفاع السريع لدرجة الحرارة الذي يلي عملية البلمرة، مما يؤدي إلى ضغط ميكانيكي على جدران المسامات يكون أحيانا كافيا لإحداث تصدعات وشقوق في الحجارة، ولتجنّب ذلك يتم

---

[1] Domasloswski (W), Op.Cit., p.131
[2] Ozturk (I), Op.Cit., p.12

خفض جزيئات المونومير المتغلغلة وذلك بخفض تركيز المحلول المقوي، فنحصل على ضغط أقل ونتجنب أي خطر.[1]

في حالات تطبيق المقويات العضوية لا يجب القيام بسد للمسامات بشكل تام، لأن التغيرات في درجة الحرارة تسبب ضغط داخل الحجارة بسبب التباين الكبير في معاملا العناصر الفلزية للحجارة والراتنج، إن أفضل صيغة لتغلغل المقويات العضوية هي وصل جزيئات الحجارة فيما بينها بواسطة جسور من المادة المقوية، وتسمح هذه الطريقة بحركة السوائل والبخار.[2]

عادة ما يطبق هذا النوع من المقويات مذابة في محاليل وتلعب المذيبات العضوية دورا كبيرا في فعالية التقوية، نسمي مذيب كل سائل يمكنه أن يذيب مادة من دون أن يغيّر في تركيبتها الكيميائية، عندما تكون المادة المذابة صلبة يسمى الخليط محلولا، ويرتبط حد تشبّع أي مذيب بخصائصه الفيزيوكيميائية وأيضا بدرجة حرارته، بحيث تتم إذابة كمية أكبر من المادة إذا ما زيد في درجة الحرارة.

يقوم المذيب بفك الغرتباط بين جزيئات الراتنج، بحيث يكون إنجذاب جزيء المذيب إلى جزيء الراتنج أكبر من إنجذاب جزيئات الراتنج فيما بينها، وليتم ذلك يجب إن يكون المركبين متلائمين وذلك من خلال:[3]

- يعمل المذيب على خفض الروابط الكهربائية قوى "فان ديرفال" بين جزيئات المادة المذابة، ولا تعتبر هذه القوى روابط كيميائية حيث أن الإلكترونات تبقى في ذراتها ولا تنتقل.
- إذا كان المذيب يحتوي على جزيئات قطبية، فإن جزيئاته تلتفّ حول جزيئات الراتنج والتي هي الأخرى تملك شحنات قطبية، هذا التفاعل يتم بواسطة أيونات الهيدروجين ذات شحنات سالبة وأيونات الأكسجين ذات شحنات موجبة، وتسمى هذه الظاهرة بالتذويب (solvatation).

[1] Ozturk (I), Op.Cit., p.12
[2] Lazzarini(L) & Tabasso (L), Op.Cit., p.167
[3] Torraca (G), *Solubilité et solvants*…, Op.Cit., p.63

تقسم المذيبات بحسب طبيعتها الى عائلتين رئيسين:[1]

- مذيبات غير بروتوية (solvants aprotiques): ترتبط كل ذرات الهيدروجين بذرات الكربون

- مذيبات بروتوية (solvants protiques): بعض ذرات الهيدروجين تكون متصلة بذرات أخرى غير ذرات الكربون، كذرّات الأكسجين أو الأزوت مثل الماء والإيثانول والميثانول.

من بين أهم المعايير التي تحدد طبيعة المذيب:[2]

(ε) (Constante diélectrique) تعبّر عن إمكانية المذيب في الفصل بين الشحنات

(μ) (Moment dipolaire) يرتبط أساسا بالمسافة التي تفصل بين شحنتين

وإنطلاقا من هاذين المعيارين تقسم مذيبات غير بروتية إلى قسمين:

- مذيبات قطبية غير بروتونية: μ وε ضعيفين، وهي مذيبات لا يمكنها أن تشكل روابطا هيدروجينية، وهي ضعيفة التأيّن والإذابة مثل: التوليان.

- مذيبات قطبية بروتوية: μ وε عاليين، تعتبر موادا عالية الإذابة، هذا النوع من المذيبات تعتبر مذيبات جيدة للكاتيونات وضعيفة نوعا ما حيال الأنيونات مثل: الأسيتون.

ترتبط سرعة تبخّر المذيب بطبيعة المادة المقوية المذابة فيه والمدة الزمنية الكافية لبلمرتها، فإذا كانت سرعة التبخّر عالية يؤدي هذا إلى تغلغل ضعيف، وإذا كان تبخر المذيب بطيء يؤدي ذلك لعدم بلمرة المادة المقوية في الوقت المحدد مما يؤدي إلى تغلغل غير متجانس، يمكن تحديد سرعة التبخّر من خلال ضغط بخار المذيب في درجة حرارة طبيعية، ويقاس هذا الضغط بالمليمتر الزئبقي، فعلى سبيل المثال يعتبر الأسيتون من بين المذيبات سريعة التبخّر، بينما يعتبر كل من الغليسيرين والإيثانولامين الثلاثي (Triéthanolamine) من بين المذيبات بطيئة التبخّر.[3]

[1] Barbe (R), Op.Cit., p.230
[2] Ibid., p.231
[3] Torraca (G), *Solubilité et solvants utilisés* ..., Op.Cit., p.64

تقسم الراتنجات العضوية إلى حرارية الصلابة (Thermodurcissables) وحرارية اللدونة (Thermoplastiques)، تستعمل العائلة الأولى كمواد للتقوية حيث تطبق على شكل محاليل ممزوجة بمصلّب (Durcisseur)، يكون هذا الأخير مسئول عن عملية التصلّب داخل المسامات وفي الشقوق الدقيقة، تطبق عادة راتنجات إيبوكسيدية أو بوليستيرية بعد أن يتم مزجها مع مذيبات عضوية وبتركيز يسمح بخفض في اللزوجة وتأخير عملية التصلّب وتجنّب الإنسداد الكلي للمسامات.[1] تمتاز الراتنجات حرارية الصلابة بأنها ضعيفة الإرجاعية بسبب الروابط الكيميائية القوية التي تربط السلاسل فيما بينها مما يمنحها صلابة عالية، ومن بين أهم مساوئ هذا النوع من المقويات هو تغيّر لونها حيث يميل للإصفرار خاصة عندما تكون معرضة للضوء، وأيضا من أهم عيوبها أنها غالبا ما تقوم بالسد الكلي للمسامات ما يمنع حركة الماء والبخار، لذا فإنه لا ينصح بإستعمال هذا النوع من الراتنجات في عمليات التقوية،[2] لكن أجريت العديد من الدراسات بهدف تحسين ورفع من خصائص هذه الراتنجات ما يؤهلها لتؤدي وظيفة التقوية بفعالية أكبر.

أما العائلة الثانية وهي الراتنجات حرارية اللدونة فإنها تستعمل على نطاق أوسع في عملية التقوية خاصة الأكريليكية منها، كما يستعمل هذا النوع من المواد كمقويات مؤقتة أثناء التدخلات المستعجلة بسبب إرجاعيتها الجيدة، بحيث أن الراتنجات حرارية اللدونة مشكلة من سلاسل مرتبطة فيما بينها بروابط ثانوية ضعيفة تزول بسهولة بوجود المذيب المناسب، بالمقابل لها تغلغل ضعيف بسبب جزيئاتها الكبيرة، ما يؤدي بها إلى ترسّبها في المسامات القريبة من السطح، لذا فإنها تطبق على شكل مونومير لمعالجة مشكل التغلغل، من بين أنواع راتنجات حرارية اللدونة الأكثر إستعمالا في مجال التقوية نجد الميثاكريلات وخلات البوليفينيل.[3]

---

[1] Torraca (G), *Matériaux poreu…*, Op.Cit., p.91
[2] Ozturk (I), Op.Cit., p.13
[3] Bonora (R), « *L'utilisation des résines pour la conservation et la protection de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.245-254

تعتبر كلا من ميثاكريلات الميثيل (Méthacrylate de méthyle) وميثاكريلات البيتيل (Méthacrylate de butyle) من بين أكثر المونومير الأكريليكية المستعملة في تقوية الحجارة، هناك عدة طرق تستعمل لبلمرة هذه المونومير بعد تغلغلها كإستعمال الأشعة فوق البنفسجية وأشعة غاما، تختلف طبيعة البوليمير الناتج بحسب نوع المونومير المطبق، فمونومير ميثاكريلات الميثيل ينتج عنه بوليمير صلب متعدد ميثاكريلات الميثيل (Polyméthacrylate de Méthyle) (PMMA)، بينما ينتج عن ميثاكريلات البيتيل بوليمير يمتاز بنوع من المطاطية، يمكن إستعمال مقوي مشكل من عدة مونومير أكريليكية، وتشكّل سلاسل البوليمير يسمى متعدد البوليمر الأكريليكي (Copolymères acryliques)، ويعتبر بارالوييد بـ-72 (Praloïd B-72) (يسمى أيضا الأكريليويد بـ-72 (Acryloid B-72)) من بين الراتنجات الأكثر إستعمالا في مجال صيانة المواد الأثرية ويطبق في إطار التقوية المؤقتة أو الدائمة، وهو عبارة عن متعدد ميثاكريلات الإيثيل وأكريلات الميثيل.[1]

إلا أن بعض الدراسات مثل مشروع ترميم كاتدرائية "سان بيترونيو" في بولونيا سنة 1981 أظهرت أن مادة البرالوييد تعدّ عامل لصق أكثر منها عامل تقوية، بحيث طبقت في الشقوق الدقيقة وأعطى هذا العلاج نتائجا إيجابية، لكن تبقى فعاليتها في حالات فقدان التماسك منخفضة بسبب تغلغلها الضعيف، مما يؤدي أحيانا إلى تراكمها وتشكيلها لطبقة قريبة من السطح تمنع من حركة السوائل والغازات فتشكّل حاجزا للأملاح المعاد تبلورها ومكانا لتجمد الماء مما يؤدي في كثير من الحالات إلى إنفصال الطبقة السطحية للحجارة المعالجة.[2]

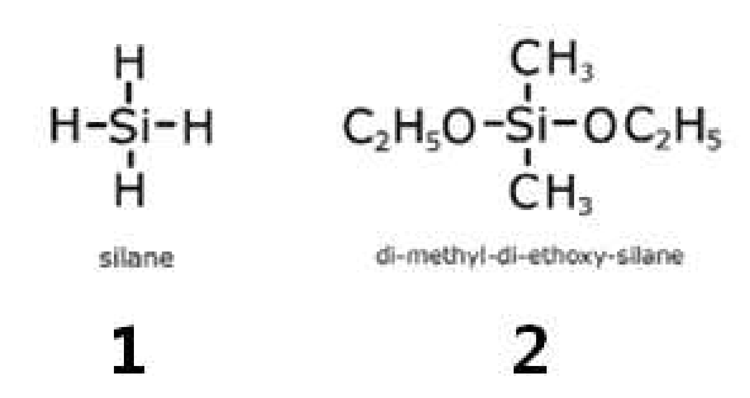
بصفة عامة تكمن أهم مساوئ المقويات العضوية في تعرضها للتلف السريع بسبب تفاعلها مع الأكسجين والأشعة فوق البنفسجية، حيث يتغيّر لونها وتفقد خصائصها في غضون بضع سنوات، بالإضافة لإعادة فقدان الحجارة المعالجة لتماسكها عند تعرضها للرطوبة لمدة طويلة بسبب إنجذاب الماء نحو العناصر الفلزية،

[1] Ozturk (I), Op Cit., p.14
[2] Torraca (G), « Philosophie générale…, Op.Cit., pp.187-210

حيث تحتلّ جزيئات الماء نقاط الإتصال بين عناصر الحجارة وبين جسور الراتنج، وتسمى هذه الظاهرة بالترطيب الإنتقائي،[1] بالإضافة الى الفرق بين عاملي التمدد الحراري بين الراتنج والحجارة، هذه العوامل مجتمعة قد تتسبب في إنفصال الأجزاء المعالجة عن الأجزاء السليمة.[2]

3-IV مواد مشكلة من السيلسيوم:

تضم هذه المجموعة عدة مواد يشكّل عنصر السيليسيوم (Si) هيكلها الأساسي، يمكن لذرة (Si) أن ترتبط بأربع ذرات من (H) بواسطة روابط تكافئية كما هو الحال بالنسبة لذرة (C)، إهتم الباحثين بإنتاج مركبات إنطلاقا من الرابطة C-Si التي لديها خصائص مميّزة يمكن تطبيقها في العديد من المجالات، إستعملت في البداية السيليكات القاعدية والفليوسيليكات لتقوية الحجارة الرملية والحجارة الكلسية، يتفاعل هذا النوع من المواد مشكلا مادة السيليس أو السيليكات غير قابلة للذوبان في الماء تعمل على ربط العناصر التي فقدت تماسكها.[3]



الشكل رقم 9: تمثيل للتركيبة الكيميائية الأساسية للسيلان

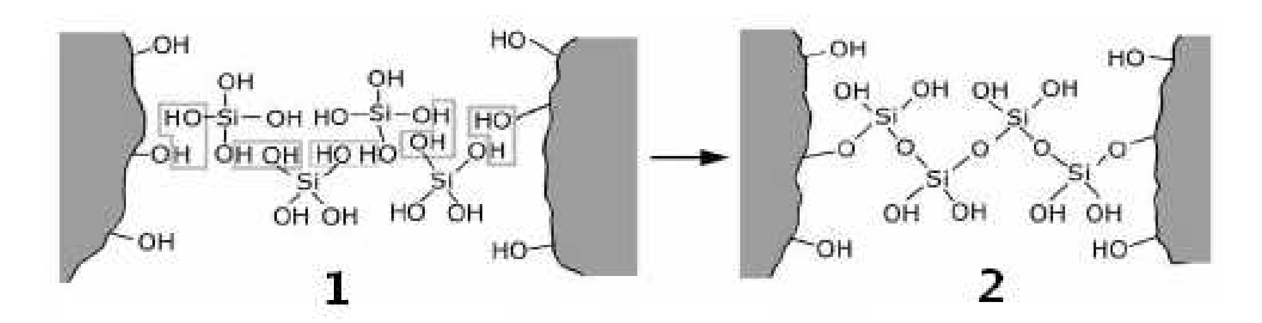
(Toracca (G) 2009)

[1] Torraca (G), « *Philosophie générale*…, Op.cit., pp.187-210
[2] Ozturk (I), Op Cit., p.13
[3] Torraca (G), *Lectures on materials…*, Op.cit., p.175

عندما تتميّه مادة السيليس في الشبكة المسامية للحجارة تنتج عنها مادة قليل الحموضة تعرف بحمض السيليس $Si(OH)_4$ وهي عبارة عن إرتباط لرباعيات الوجوه مشكلة لسلاسل تتأثر بالرطوبة، ففي الجو الرطب تتفكك الروابط بين $Si(OH)_4$ وبغياب الرطوبة ترتبط فيما بينها (الشكل رقم:10) يشكّل حمض السيليس روابط كيميائية مع مجموعات الهيدروكسيل (OH) الموجودة في سطح الحجارة وذلك بإختزال جزيئات الماء وتعويضها بجسور الأكسيجين (الشكل رقم:11)، كما يلتحم السيليس مع الحجارة بواسطة روابط كيمائية ويمكنه ملئ فراغات الدقيقة الأقل من 0.1 ملم الناتجة عن فقدان التماسك.[1]

الشكل رقم 10: تمثيل الإرتباط الكيميائي لحمض السيليس $Si(OH)_4$

(Torraca (G) 2009)



الشكل رقم 11: شكل توضيحي للآلية الكيميائية لإلتحام المواد السيلانية بالحجارة

(Toracca (G) 2009)

[1] Torraca (G), *Lectures on materials…*, Op.cit., p.176

إن السيليكات عبارة عن إتحاد بين السيليس والماء وعناصر كيميائية أخرى، فتتشكل سيليكات الصوديوم أو سيليكات البوتاسيوم، تتفاعل السيليكات مع الماء فينتج حمض السيليس $Si(OH)_4$ وفق تفاعل الحلمأة، فيتشكّل هذا الحمض ويتكاثف في المسامات مشكلا هلام السيليس.[1] من بين أهم مساوئ إستعمال السيليكات هي تشكّل أملاح قابلة للذوبان مثل كربونات البوتاسيوم أو الصوديوم، وتتشكّل هذه الأملاح وفق المعادلة التالية:

$$K_2SiO_3.aq \quad + \quad CO_2 \rightarrow \quad SiO_2.aq \quad + \quad K_2CO_3$$

سيليسكات البوتاسيوم (محلول)	ثاني أكسيد الكاربون	هلام السيليس المميه	كربونات البوتاسيوم

من بين المساوئ إستعمال السيليكات أيضا هي تشكّل ترسبات لهلام السيليس على السطح والمناطق القريبة منه، ما يمنع تغلغل غاز ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء الى داخل الحجارة، ما يؤدي إلى عدم إتمام تفاعل كلسنة المحلول السيليكاتي في العمق، كما أن اللزوجة العالية لهذه المادة تمنع من تغلغل جيد في الشبكة المسامية، جرّبت عدة أنواع من الفلوروسيليكات القابلة للذوبان لتقوية الحجارة الرملية والكلسية، مثل فيلوروسيليكات المغنيزيوم والزنك والألومنيوم إلا أنها غالبا ما أعطت نتائجا غير مشجعة.[2]

في العشريات الأخير إنتشر إستعمال المواد المشكلة من السيلان في عمليات التقوية، هذه المواد تتم عملية بلمرتها داخل الحجارة، ولكي يتم هذا التفاعل يجب توفر كمية معينة من الرطوبة، تنتج عن عملية البلمرة مادة السيليس وهي شبيهة إلى حد كبير للمادة الرابطة للحجارة الرملية، تختلف درجة تغلغلها بحسب نوع المادة

---

[1] Ozturk (I), Op Cit., p.14
[2] Ibid., p.15

المستعملة ونوع المذيب وطريقة التطبيق، كما تمتاز المواد السيلانية في كونها ترفع من الخصائص الميكانيكية للحجارة المعالجة.[1]

تعتبر سيليكات الإيثيل مركبات عضوية من عائلة السيلان، وتتشكل جزيئاته من ذرة سليسيوم (Si) مركزية مرتبطة بعدة جذور من الإيثيل ($-C_2H_5$) بواسطة روابط (Si–O) وجذور هيدروكربونية أخرى، تمزج غالبا هذه الجزيئات بمحفّز وتطبق على سطح الحجارة على شكل محلول ذو لزوجة منخفضة، تتفاعل المادة المقوية مع جزيئات الرطوبة الموجودة في الشبكة المسامية التي في الغالب تكون ممتزّة (Adsorbé) على جدران المسامات وتؤدي إلى حلمأة سيليكات فينطلق الإيثانول على شكل غاز، وتتكاثف الجزيئات المحلمأة لتشكل بولمير هلام حمض السيليس، ويترسب على جدران المسامات مشكلة مادة رابطة للعناصر الفلزية، بحيث تبقى المسامية في غالبيتها حرة.[2]

ترتبط أربع مجموعات من OC_2H بذرة (Si) ، وبوجود الماء يتم تفاعل الحلمأة منتجا حمض السيليس $Si(OH)_4$ والكحول الإيثيلي (C_2H_5OH) وفق المعادلة الكيميائية التالية:

$$Si\ (OC_2H_5) + 4H_2O \rightarrow Si(OH)_4 + 4C_2H_5OH$$

يتميّز سيليكات الإيثيل بلزوجة منخفضة ما يسمح بنفاذية عالية في المسامات والشقوق الدقيقة أين يتشكّل حمض السيليس بوجود كمية معينة من الماء، وتتميّز حلمأة سيليكات الإيثيل بتفاعل بطيء ما يمنع تشكل حمض السيليس على السطح وأثناء التفاعل ينطلق كحول الإيثيل كمادة ثانوية للتفاعل حيث لا يشكل أي خطر على الحجارة.[3]

تطلق تسمية السيلان على المركب البسيط (SiH_4)، ويمكن ربط جزيئات عضوية بذرة (Si) من خلال إرتباط هذه الأخيرة بذرة (C) (الشكل رقم:12)، وتأخذ

[1] Torraca (G), *Lectures on materials…*, Op.Cit., p.180
[2] Rousset (B) & Christine Bläuer (C), *cathédrales de Bâle, de Berne,de Fribourg et de Lausanne projet de contrôle et de suivi des consolidations - résultats des tests de laboratoire,* Conservation ScienceConsulting Sarl, Fribourg 2009, p.09
[3] Torraca (G), *Lectures on materials*…, Op.Cit., p.181

هذه المواد بعض خصائص المواد العضوية مثل عزل الرطوبة، وخصائص أخرى خاصة بالمواد غير العضوية مثل المقاومة للحرارة، وينتج التفاعل رباعي كلورير الكربون (CCl_4) مع الكحول بدوره جزيئات مستقرة، يمكن إعتبار سيليكات الإيثيل المنتج بهذا النوع من التفاعل من عائلة السيلان، لكنه يفقد كل خصائصه العضوية كعزل الرطوبة بعد تطبيقه على المادة الأثرية نتيجة فقدانه لمجموعة الإيثيل.[1]

$C_2H_5O-Si(R)_2-OC_2H_5$
di-alkyl-di-ethoxy-silane

$(C_2H_5O)_3-Si-R$
alkyl-tri-ethoxy-silane

$Si(OC_2H_5)_4$
ethyl silicate
(tetra-ethoxy-silane)

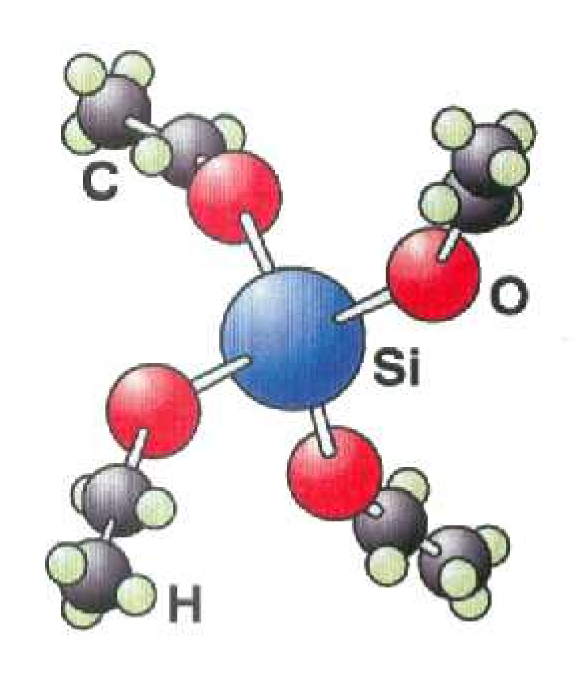
silanes used in architectural conservation

الشكل رقم 12: صيغ كيميائية لأهم المقويات السيلانية المستعملة في تقوية الحجارة

(Toracca (G) 2009)

أعيد الإهتمام بألوكسي سيلان في ميدان تقوية الحجارة، وأجريت العديد من الدراسات والأبحاث حول هذه المادة، وأعطت هذه الدراسات نتائج إيجابية ساهمت في إنتشار تطبيق هذه المادة خاصة في تقوية الحجارة الرملية، إن ألوكسي سيلان عبارة عن مونومير لديه إمكانية الحلمأة بوجود الرطوبة لتشكيل مادة السيليس أو سلاسل من ألكيل بوليسيلوكسان (Alkylpolysiloxanes)، من بين أنواع ألوكسي سيلان الأكثر إستعمالا لتقوية الحجارة هو رباعي إثوكسي سيلان (Tétraéthoxysilane) $Si(C_2OH_5)_4$ (الشكل رقم:13) الذي يعرف إختصارا بـ (TEOS) كما تستعمل موادا أخرى من نفس العائلة مثل ثلاثي إيثوكسي ميثيل السيلان (Triéthoxyméthylsilane) وثلاثي ميثوكسي ميثيل السيلان (Triméthoxyméthylsilane).[2]

[1] Torraca (G), *Lectures on materials science…*, Op.Cit., p.181
[2] Ozturk (I), Op.Cit., p.15



الشكل رقم 13: رسم تمثيلي لجزيء رباعي إثوكسي سيلان

(TEOS) المعروف بـ $Si(C_2OH_5)_4$ (Tétraéthoxysilane)

يعتبر الألكوكسي سيلان الذي ينتمي إلى عائلة السيلان الأكثر إنتشارا في مجال تقوية الحجارة خلال العشريتين الماضيتين، وهناك مركبين أساسين من هذه العائلة الأكثر إستعمالا وهما:

- رباعي الإيثيل أوكسي سيلان (Tétra-éthoxysilane) ويطلق عليه إختصارا (TEOS)
- ميثيل ثلاثي الميثوكسي سيلان (Méthyltriméthoxysilane) ويطلق عليه إختصارا (MTMOS)

ينتج عن حلمأة السيلان بواسطة جزيئات الماء مادة السيلانول (Silanol) التي تتبلمر من خلال عملية التكاثف معطية بوليمير سيليكوني، إن مصدر الماء الذي يدخل في عملية الحلمأة يكون إما من الرطوبة الموجودة في الجو أو الرطوبة الموجودة في الشبكة المسامية للحجارة المعالجة.[1] ومن بين أكثر الجذور العضوية إستعمالا في كيمياء السيلان نجد:

[1] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.40

التسمية	التركيبة الكيميائية
Methyl	$C H_3$
Ethyl	$C_2 H_5$
Propyl	$C_3 H_7$
Buty	$C_4 H_9$
Amyl	$C_5 H_{11}$

الجدول رقم 07: أهم الجذور العضوية المشكلة للمقويات السيلانية
(Toracca (G) 2009)

عند تطبيق ألوكسي سيلان تمر عملية البلمرة بمرحلتين: الحلمأة والتكاثف، بعد إنتهاء التفاعل تتشكل الرابطة الكيميائية (- Si - O - Si -) وهي المسئولة على آلية التقوية، هناك عدة عوامل تؤثر في هذا التفاعل كتركيز المادة الفعالة وكمية الرطوبة الموجودة في الشبكة المسامية ونوع المحقّز وطبيعة المذيب المستعمل،[1] يطبق رباعي إثوكسي سيلان (Tetra-Eth-Oxy-Silane) (TEOS)، على شكل محلول ذو لزوجة منخفضة قريبة من لزوجة الماء ويتميّز بقابلية عالية للتبلّل مما يسمح بتغلغل جيد في نسيج الحجارة، إلى جانب عدم خفضه المعتبر لمسامية الحجارة المعالجة، ويتفاعل مع الرطوبة ليشكل سيليس غير بلوري ومستقر كيميائيا وفق المعادلة الكيميائية التالية:[2]

$$(C_2H_5O)_4 Si + nH_2O \rightarrow SiO_2.nH_2O + 4C_2H_5OH$$

هذه التفاعلات الكيميائية تتأثر بدرجة الحرارة ونسبة الرطوبة، حيث أن للجذور الهيدروكربونية طبيعة عازلة للرطوبة لذا فيجب العمل على حلمأة أغلبية هذه الجذور، وليتم هذا التفاعل يجب أن تتوفر كمية مناسبة من الرطوبة في المسامات لتتم عملية الحلمأة وكنتيجة لهذا التفاعل تتشكل أغشية من البولمير، ويشترط عدم وجود الماء في حالته السائلة في الشبكة المسامية، لأن جزئيات الماء تقوم بعزل أجزاء من البولمير أو

[1] Ozturk (I), Op.Cit., p.16
[2] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.40

الأوليغومير ما يسبب في إبقاء حوافه عازلة للرطوبة.[1] تعتبر سيليكات الإيثيل من بين المقويات الواسعة الإستعمال في مجال تقوية الحجارة الرملية، وذلك لتقارب تركيبتها الكيميائية مع فلز الكواتز إلى جانب وزنها الجزيئي المنخفض الذي يساعد على تغلغل جيد، بالإضافة إلى عدم تأثرها بالأشعة فوق البنفسجية عكس الكثير من المواد المقوية العضوية.[2] وفي دراسات حديثة تم إختبار الألوكسي سيلان على شكل جزيئات النانو وأعطت التجارب نتائج مشجعة، إلى جانب إختبار سيلان لها خاصية مطاطية منها ما طرح في السوق مثل المقوي (KSE 500 E).[3]

في كثير من الحالات طرح إشكالية الرابطة غير القوية بين مواد التقوية السيليكاتية وفلز الكالسيت، ففي عمليات تقوية الحجارة الكلسية يعتبر هذا مشكلا حقيقيا، أجريت عدة أبحاث خاصة التي قام بها "ويلر" (Weeler)، أما فيما يخص نجاح تطبيق الألوكسي سيلان على الرخام فإن مادة التقوية تتغلغل في البداية بين حبيبات الكالسيت الفاقدة للتماسك، ما يعطي إمكانية إلتحام ما بين المقوي وحبيبات الكالسيت المشكلة للرخام.[4]

تملك جزيئات السيليس المتشكّلة نفس التركيبة الكيميائية مع السيليكات، هذا ما يعطيها القدرة على تلائم جيد مع الحجارة السيلسية، عكس الحجارة الكربوناتية حيث ينعدم التلائم مع كربونات الكالسيوم، أكثر من ذلك فقد بينت بعض الدراسات كالتي قام بها "قوينس" (Goins) 1992 و"دانيي" (Danehey) 1996 أن فلزات الكالسيت المشكلة للحجارة الكلسية تعمل على كبح عملية بلمرة السيليس.[5]

فبالرغم من أن بعض الأبحاث أكدت عدم تلائم سيلسكات الإيثيل مع الحجارة الكلسية كالأبحاث التي قام بها ويلر (Wheeler, 2005)، ورغم هذا التباين في نتائج الأبحاث، يبقى سيليكات الايثيل المقوي الأمثل في غياب مواد أكثر فاعلية، بعض

---

[1] Rousset (B) & Christine Bläuer (C), Op.Cit., p.09
[2] Ibid.
[3] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.40
[4] Ibid.
[5] Ibid., p.42

الباحثين حاولوا الرفع من فعاليته بتطبيق قبلي لمذيب عضوي فعّال يعمل على تهيئة كربونات الكالسيوم وجعلها أكثر تلائما مع جزيئات المقوي، هذا المذيب يعمل على تشكيل طبقة هيدروكسيلية على سطح فلزات الكالسيت.[1]

يؤدي تشكل السيليس إلى تغيير في بعض خصائص الحجارة، وقد لاحظ الباحث "مارتز" (Mertz) زيادة في التمدد المائي (Dilatation hydrique) حيث تتشكل جزيئات من الماء بعد معالجة الحجارة بمادة سيليكات الإيثيل، مما يؤدي في بعض الحالات الى ظهور تلف على المدى المتوسط والبعيد،[2]، إلى جانب هذا فإنه من الضروري معرفة تأثير الجزيئات التي لم تتحلمأ بعد تشكل النهائي لهلام السيليس، وفي بعض الحالات تنتقل المادة المقوية مع تبخّر المذيب على السطح قبل إتمام تفاعل الحلمأة، لكن يبقى العائق الأساسي لكثير من هذه المواد هو تغيّر في لون الحجارة بعد العلاج، أضف إلى ذلك التغيّر في بعض الخصائص مثل المسامية وتوزيع المسامات والنفاذية، وهذا ما قد يؤثر على مقاومة الحجارة لتبلور الأملاح ولتشكّل الجليد خاصة في الأجزاء التي تفصل المناطق المعالجة والأخرى غير المعالجة، أضف الى هذا كله فإن تكلفة سيليكات الإيثيل تبقى عالية مقارنة لمواد أخرى.[3]

بالرغم من بعض سلبيات المواد السيلانية فإن الكثير من الباحثين في مجال الصيانة يعتبرونها من بين أكثر البوليمير إستقرارا ويمتاز بلزوجة منخفضة جدا، هذا ما يسمح له بالتغلغل الجيد في الحجارة، وتتم عملية البلمرة عند تفاعله مع الماء الموجود في الشبكة المسامية، ويعتبر رباعي إثوكسي سيلان (TEOS) الأكثر فعالية من بين هذا النوع من المقويات، والأسماء التجارية الموجودة حاليا والأكثر تسويقا هي (Wacker OH) و(Tegovakon V).[4]

[1] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.41
[2] Rousset (B) & Christine Bläuer (C), Op.Cit., p.25
[3] Ozturk (I), Op.Cit., p.16
[4] Mosquera (M) & al, «Application of mercury porosimetry to the study of xerogels used as stone consolidants», in Journal of Non-Crystalline Solids 311 (2002), pp.185–194

تستعمل مواد أخرى بغرض تقوية الحجارة الأثرية مشكلة من عنصر (Si) مثل البوليسيلوكسان (Polysiloxanes) وهي تعد من بين البولمير السيلكونية، بعد النتائج غير المشجعة في بدايات إستعمالاتها كظهور طبقة كتيمة على سطح الحجارة، عدلت تقنية تطبيقها من أجل الحصول على تغلغل أكثر تجانسا،[1] كما تطبق في عمليات التقوية مادة السيليكوبروبيونال (Silicopropionale)، تنتج عن هذه المادة أثناء تفاعلها داخل الحجارة مادة ثانوية عبارة عن الإيثانول، وهي مادة طيّارة (Volatile) غير ضارة، تستعمل هذه المقويات خاصة لمعالجة للحجارة الرملية.[2]

V- فعالية عملية التقوية :

إن فعالية أي مادة مقوية لا ترتبط فقط بنوع المادة المطبقة وخصائص الحجارة المعالجة، وإنما ترتبط أيضا بشكل وثيق بطرق تطبيقها وعوامل المحيط أثناء العلاج، كل هذه العوامل متداخلة تحدّد نجاعة وفعالية عملية التقوية، من أجل إجراء عملية تقوية فعالة يجب تحديد عدة عوامل:[3]

- نوع الحجارة وخصائصها: التركيبة الكيميائية والفلزية المشكلة للحجارة، الخصائص الفيزيائية كالهندسة المسامية وخاصية إمتصاص السوائل والغازات، وخصائص ميكانيكية كقساوة السطح والمقاومة الميكانيكية، أبعاد المساحة المتلفة
- خصائص المادة المقوية: الطبيعة الكيميائية للمقوي والمذيب، تركيز المادة المقوية
- طريقة التطبيق: تقنية التطبيق، عدد التطبيقات، المدة الزمنية لكل تطبيق، المدة الزمنية بين كل تطبيق
- كمية المادة المقوية المطبقة والكمية المتغلغلة في الحجارة
- عوامل المحيط أثناء وبعد تطبيق العلاج : درجة الحرارة، الرطوبة النسبية
- شروط خاصة بالحجارة: كمية الماء المحتجزة في الحجارة، طبيعة السطح، درجة قابلية التبلّل

[1]Tobasso (L), Op.Cit., pp.221-222
[2] Torraca (G), « *Philosophie générale*…, Op.Cit., pp.187-210
[3] Pinto (F) & Rodrigues (D), «*Stone consolidation: The role of treatment procedures*», in Journal of Cultural Heritage 9 (2008), pp 38-53

بالرغم من فعالية بعض المقويات لدى تطبقها إلا أنها بعد بضع سنوات تفقد بعض خصائصها، فيؤدي ذلك لتغيّر في لونها ما يؤدي في تغير في لون الحجارة المعالجة، كما تفقد هذه المواد من قوة ربطها بين العناصر الفلزية، لذا فإنه من الضروري عند إختيار المادة المقوية أن يؤخذ بعين الإعتبار عنصر الإستقرار ومقاومة الظروف المحيطة كالرطوبة والحرارة والضوء والتلوث، كما يجب الأخذ بعين الإعتبار بأن نتائج التجارب التي تجرى على العينات الحجرية في المخابر لا يمكن إسقاطها بشكل آلي على المادة الأثرية الموجودة في المواقع والمتاحف، لأنه غالبا ما تكون عينات الدراسة ذات أحجام صغيرة ويتم علاجها بشكل جيد وتكون الظروف المحيطة متحكّم فيها، لذا يجب الإستفادة من مختلف الدراسات المخبرية بالقدر التي تفيدنا في عمليات التقوية التي تجرى في الموقع.

تؤدي عملية التقوية لخفض متفاوت في المسامية الأصلية للحجارة بشكل غير متجانس، هذا ما قد يؤدي إلى إحتباس الماء والبخار في المناطق التي تفصل الأجزاء المعالجة (مسامية منخفضة) والأجزاء غير المعالجة (مسامية مرتفعة)، هذا ما أدى إلى إعتماد مقويات التي لا تؤدي إلى خفض كبير في المسامية بحيث يقلّل من تغلغل الماء إلى الحجارة من جهة والحفاظ على نفاذية جيدة لبخار الماء من جهة أخرى،[1] وتكمن التقوية المثلى أساسا في محاولة إسترجاع الخصائص الأصلية للحجارة، ومن بين أهم هذه الخصائص: المقاومة الميكانيكية، المسامية، النفاذية، التمدد الحراري، اللون.

1-V عقبات عملية التقوية :

لا تخلو أي عملية من عمليات الصيانة من نقائص وسلبيات، وتهدف مختلف الدراسات والأبحاث التي تجرى في مجال العلاج إلى محاولة حصر سلبيات العلاج وجعلها أقل ضررا وتأثيرا على المادة الأثرية، فيما يخص تقوية الحجارة يعتبر التغلغل السيىء وتغيّر لون الحجارة المعالجة من بين أهم سلبيات العلاج، بالإضافة إلى صعوبة تحديد الكمية الملائمة للمقوي، حيث لا ينصح تشبيع الحجارة بالمادة

[1] Lazzarini (L) & Tabasso (L), Op.cit., p.218

المقوية لتفادي سد كلي للمسامات ما يؤدي إلى تغيير في نفاذية وحركة بخار الماء، كما يؤدي هذا إلى تغيير في الخصائص الفيزيائية للحجارة المعالجة مقارنة بالأجزاء السليمة، لكن يبقى هذا المبدأ نسبي بحسب نوع المقويات المستعملة، ويمكن حصر أهم عقبات عملية التقوية فيما يلي:

V- 1-1 عمق التغلغل:

إن فعالية العلاج ترتبط بشكل مباشر بكمية المادة المتغلغلة وإنتشارها المتجانس، إلا أنه يمكن لعوامل أخرى أن تؤثر بدرجات متفاوتة على النتائج النهائية للعملية، من الناحية النظرية يمكن القول أن عمق التغلغل الأدنى للمادة المقوية هو 25 ملم بحسب طبيعة المادة، لكن في الواقع هناك القليل من المقويات التي يمكنها أن تتغلغل إلى عمق كبير بإستثناء موادا معدودة كالمواد السيلانية، بينما أغلب المواد الأخرى كفليوسيليكات والأكريليك والفينيل والإيبوكسي والبولي إيريثان كلها تتميّز بتغلغل ضعيف بسبب جزيئاتها الضخمة والتي تصل أبعادها إلى مئات الأنستروم (Angström) (1 أنستروم = 10^{-10} م)، ما يجعل محاليلها تمتاز بلزوجة عالية،[1] وهو السبب الأساسي في ضعف تغلغلها خاصة بالنسبة للحجارة ذات المسامات الدقيقة، لذا فإن تطبيق مواد على شكل مونومير يبقى الحل الأمثل بحيث تتم علمية البلمرة داخل الشبكة المسامية للحجارة، بالإضافة إلى المقويات غير العضوية التي تتميّز هي الأخرى بتغلغل ضعيف مثل كربونات الكالسيوم والباريوم.

سببا آخرا يضاف إلى التغلغل السيئ وهو كمية الرطوبة الموجودة في الشبكة المسامية أثناء عملية التقوية خاصة عندما يكون الوسط مشبع بالرطوبة، فالمقويات السيلانية مثلا تتطلب وجود كمية الرطوبة داخل الحجارة لتتم بلمرتها، لذا فإن نقصا في الرطوبة يؤدي بالضرورة لعدم تفاعل نسبة كبيرة من المادة المقوية، وفي المقابل فإن وجود الرطوبة في المسامات يعيق تغلغل وبلمرة أنواع أخرى من المقويات مثل

[1] Pinto (F) & Rodrigues (D), Op.Cit., pp.38-53

الأكريليك، لذا فإنه من الضروري مراقبة نسبة الرطوبة داخل الشبكة المسامية قبل تطبيق المادة المقوية.[1]



الشكل رقم 14: رسم توضيحي لمدى تغلغل المادة المقوية

(1) تغلغل جيد (2) تغلغل ضعيف

يؤدي التغلغل الضعيف للمادة المقوية وإنحساره في السطح إلى إنفصال الطبقة السطحية للحجارة المعالجة نتيجة إختلاف في التمدد الحراري للسطح وعمق الحجارة أو تحت تأثير تبلور الأملاح أو تجمد الماء تحت الطبقة المعالجة، كما هو الشأن مثلا بالنسبة للبوليمير الأكريليكي بارالوييد ب 72 (الصورة رقم:37)، كما أن تبخّر المذيب بسرعة يؤدي إلى تشكّل المادة الفعالة بالقرب من السطح ولا يكون لديها الوقت الكافي لتغلغل أعمق، ونتيجة ذلك تتشكل المادة الرابطة قريبة من السطح وبعيدة عن الأجزاء التي يستوجب علاجها.[2]

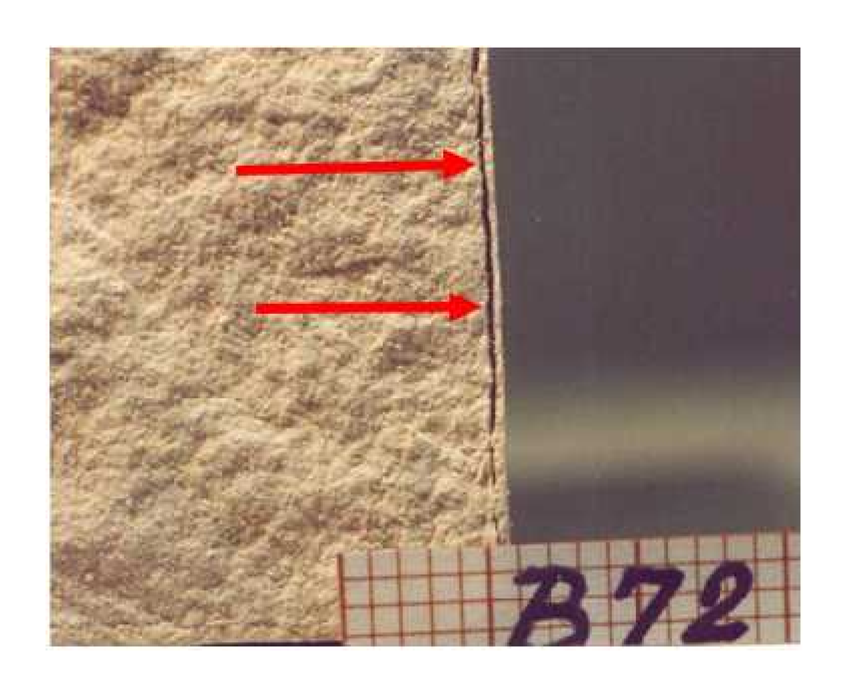
عكس الحالات السالفة الذكر أحيانا يكون التغلغل الجيد مشكل في حد ذاته، وهذا عندما يكون التلف محسورا في السطح ولا يمتد إلى العمق، في مثل هذه الحالات لا يجب أن يتجاوز المقوي حدود الطبقة السطحية، لأن من بين القواعد الأساسية للتقوية

---

[1] Lewin (S.Z), « *Substances synthétiques*…, Op.Cit., pp. 225-234

[2] Podany (J) & al, «*Paraloid B-72 as a structural adhesive and as a barrier within structural adhesive bonds: evaluations of strength and reversibility*», in JAIC 40 (2001), pp.15-33

هي إقتصار تطبيق العلاج على الأجزاء الفاقدة للتماسك فقط، ففي مثل هذه تطبق مادة مقوية ذات تغلغل ضعيف أو يطبق مقوي بتركيز منخفض.



الصورة رقم 37: إنفصال طبقة رقيقة لحجارة كلسية بسبب تغلغل سيىء لبارلويد ب72

(Podany (J) & al 2001)

V- 1-2 تغيّر لون الحجارة

في العديد من عمليات التقوية يتغيّر لون الحجارة، ويرتبط تغيّر اللون بعدة عوامل مثل طبيعة الحجارة، ففي بعض الحالات يكون تغير لون الحجارة الرملية واضحا خاصة بالنسبة للحجارة التي لها لونا فاتحا، وأيضا بحسب نوع المادة المقوية فيصبح بوليمير الفينيل قاتم عندما يبتلّ ويأخذ لونا الفاتحا عندما يكون جافا، كما أن تغيّر لون البوليمير مع الزمن بسبب تغيّر في بعض خصائصه يؤدي بالضرورة إلى تغيّر في لون الحجارة في حد ذاتها, وتعد الأشعة فوق البنفسجية السبب الرئيس في تغّير لون المقويات العضوية، كما أن الحالة الجافة أو الرطوبة للحجارة المعالجة تحّدد بدورها درجة تغير اللون بعد تطبيق المادة المقوية.[1]

[1] Doehne (E) & Clifford (A), Op.Cit., p.43

V- 2 تقييم العلاج:

من غير السهل تقييم عملية تقوية الحجارة لأن هناك عدة معايير تتحكم في هذه العملية، فعامل الزمن يلعب دورا حاسما في تقييم عملية التقوية، حيث لا يكفي تقييم التقوية بعد العلاج مباشرة بل يجب متابعة التقييم للعدة سنوات، لأن طول مقاومة المادة المقوية لمختلف التأثيرات تعتبر ميزة من مميزات الفعالية في حد ذاتها، كما أن بعض الأبحاث جرّبت موادا وطرقا تبدو للوهلة الأولى أنها فعالة لكن بمرور الوقت تبين أنها غير ناجعة وفي بعض الحالات تسرّع في عملية التلف، ومن بين أهم الشروط التي يجب تحديدها ومراعاتها في إطار تقييم عملية تقوية الحجارة هي:[1]

- تغيّر لون الحجارة بعد تطبيق المادة المقوية
- الخصائص البيتروفيزيائية كتحديد تغيّر في المسامية وما مدى تأثيره على إمتصاص الماء ونفاذية بخار الماء وسرعة التبخّر
- الخصائص الميكانيكية ومقارنة المقاومة الميكانيكية للحجارة قبل وبعد تطبيق العلاج، تغيّر في التمدد الحراري والتقلص
- عمق وتجانس تغلغل المادة المقوية
- ظروف العلاج كدرجة الحرارة ونسبة الرطوبة بالنسبة للحجارة وللوسط

هناك عدة طرق لتقييم مدى فعالية التقوية، منها ما يعتمد على وسائل بسيطة متاحة ومنها ما يعتمد على تقنيات وتكنلوجيات حديثة ومتطورة، وفيما يلي نعرض أهم الطرق والوسائل التي يمكن من خلالها تقييم عملية التقوية

V- 2-1 الخصائص البيتروفيزيائية:

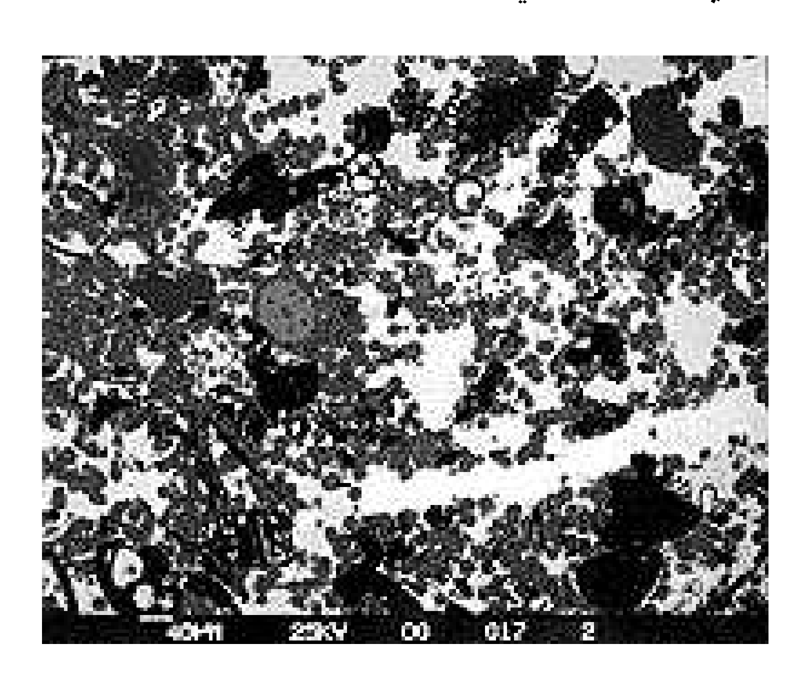
من الضروري تحديد الخصائص البيتروفيزيائية للحجارة قبل تطبيق المادة المقوية ومقارنتها بعد تطبيق العلاج، ولمعرفة الخصائص الحجارة هناك عدة تحاليل وإختبارات منها:[2]

---

[1] Pinto (F), Rodrigues (D), Op.Cit., pp.38-53
[2] Carò (F) & Di Giulio (D), «*Influence of rock petrophysics on the performances of protective and consolidation treatments to natural building stones*», in Geophysical Research 77 (2005), pp.403-433

- تحاليل بيتروغرافية من خلال دراسة الشفرات الدقيقة (Lames minces)
- قياس المسامية المفتوحة
- تحديد مقاومة السطح للكشط و للشد
- إمتصاص الماء
- تحديد اللون

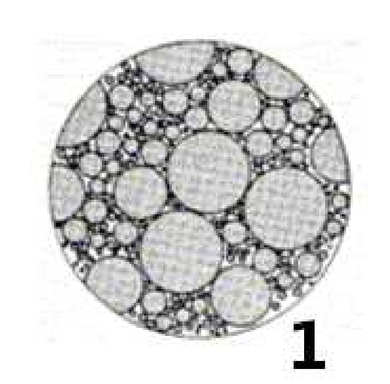
تلعب المسامية دورا أساسيا في مدى فعالية تقوية الحجارة، فقبل إقتراح أي علاج يجب أولا تحديد الشبكة المسامية للحجارة، والمسامية عبارة عن فراغات تتخلّل العناصر الصلبة للمادة ويتخذ الوسط المسامي شكل شبكة مستمرة ومعقدة مكونة من مسامات بأبعاد مختلفة تكون في غالب متّصل فيما بينها بواسطة وصلات،[1] (الصورة رقم:38) ترتبط المسامية بمدى تجانس العناصر المشكّلة للمادة، فالحجارة ذات نسيج غير متجانس عادة ما ترافقها مسامية صغيرة مقارنة بالحجارة ذات نسيج متجانس (الشكل رقم:15) لأن العناصر الدقيقة يمكنها شغل الفراغات المجودة بين العناصر الأكبر وهذا ما يؤدي إلى خفض في المسامية.

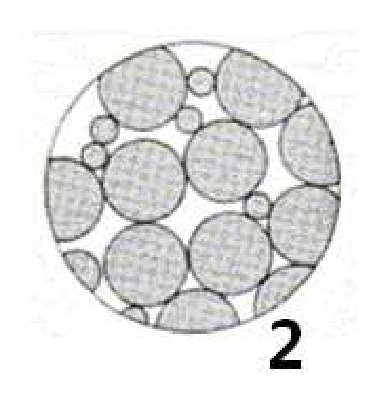


الصورة رقم 38: صورة مجهرية (MEB) لشفرة تبين مدى تعقيد الوسط المسامي المادة الصلبة باللون الأسود المسامات والشعيرات باللون الأبيض
(Beck (K) 2006)

---

[1] Beck (K), Op.Cit., p.72





الشكل رقم 15: رسم يبيّن إرتباط المسامية بتجانس العناصر المشكلة للحجارة
1/ عدم تجانس (مسامية منخفضة) 2/ تجانس (مسامية مرتفعة)

يتم تصنيف المسامية حسب معايير مختلفة، فإذا أخذنا معيار إتصال المسامات فيما بينها من عدمه فهي تقسّم إلى نوعين:

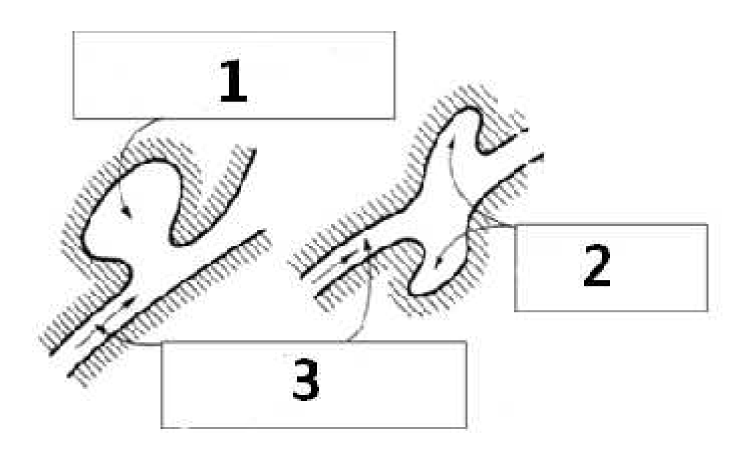
- مسامية مفتوحة، وتتشكّل من مسامات متصل فيما بينها بواسطة وصلات.
- مسامية مغلقة، وهي عبارة عن مسامات غير متصلة فيما بينها، ما يترتب عليه عدم وجود أي شكل من أشكال النفاذية أو الحركة.

كما يمكن تصنيف المسامية بحسب أبعاد المسامات وتقسّم إلى:[1]

- مسامية دقيقة (Microporosité): معدل قطر المسامات أقل من 0,0001 ملم.
- مسامية شعيريّة (Capillaires): معدل قطر المسامات والشعيرات يكون بين 0,0001 و 2,5 ملم.
- مسامية كبيرة (Macroporosité): معدل قطر المسامات أكبر من 2,5 ملم.

إن أي محاولة لتحديد فعالية مواد المقوية المطبقة تستوجب بالضرورة معرفة سلوكها داخل الشبكة المسامية للحجارة المعالجة، ولعل أكبر عائق لمعظم المقويات هو أبعاد جزيئاتها الكبيرة، وهذا ما يؤدي لتشكيل محلول مقوي ذو لزوجة عالية تمنع من التغلغل الجيدة خاصة بالنسبة للحجارة ذات المسامية الصغيرة، كما أن بعض المسامات تكون غير معنية بالحركة السوائل والغازات لأنها تقع في مناطق ميتة حيث تشكّل جيوب معزولة (Cul-de-sac) (الشكل رقم:16)

[1] Beck (K), Op.Cit., p.77



الشكل رقم 16: رسم توضيحي يبين أنواع الجيوب في الشبكة المسامية

1: مسامة على شكل جيوب (ماء غير متحرك) 2: مسامات على شكل جيوب مفتوحة (ماء قليل الحركة) 3: وصلات (ماء متحرك)

تقاس المسامية الكلية لمادة بالعلاقة بين حجم الفراغات على الحجم الكلي للمادة، ويعبّر عنها بالنسبة المئوية حسب العلاقة التالية:[1]

$$\mathbf{N_{total}\ Z 100 . V_{vides} / V_{total}\ Z\ 100 . V_{total} - V_{solide} / V_{total}}$$

$\mathbf{N_{total}}$: المسامية المفتوحة

$\mathbf{V_{vides}}$: حجم المسامات في المادة

$\mathbf{V_{solide}}$: حجم الجزء الصلب للمادة

$\mathbf{V_{total}}$: الحجم الإجمالي للمادة

تستعمل عدة تقنيات لقياس المسامية مثل طريقة الوزن الهيدروستاتي التي يتوم على مبدأ دافعة أرخميدس، حيث تغمر العينة بالماء في وسط مفرغ من الهواء مما يؤدي بتغلغل الماء في المسامية المفتوحة للمادة، ثم يتم قياس حجم الماء المتغلغل الذي

---

[1] Karaca (Z), «*Water absorption and dehydration of natural stones versus time*», in Construction and Building Materials 24 (2010), pp.786–790

يمثل حجم المسامات، كما تستعمل طريقة قياس المسامية إعتمادا على تغلغل الزئبق الذي يمتاز بخاصية عدم التبلل بإستعمال الضغط، حيث يتم حساب توزيع أبعاد المسامات التي تكون وفق ترابط عكسي لقيم للضغط المطبقة أي كلما كان الضغط أكبر فهذا دليل على وجود مسامات ذات أبعاد صغيرة، تتم معرفة أنواع المسامات وقياس أبعادها بواسطة جهاز يسمى بمقياس المسامية الزئبقي، ويمكن من خلاله الحصول على نتائج دقيقة إذ يمكنه سبر مسامات يقل قطرها عن 1/100µ .[1]

يقاس إمتصاص المادة للسوائل بواسطة معامل إمتصاص السوائل (S_{48}) ويسمى أيضا معامل "هيرشوالد" (Hirschwald) تغمر العينة في الماء لمدة 48 ساعة، ويعرف على أنه العلاقة بين حجم المحلول الممتص في الضغط الجوي بعد 48 ساعة من الغمر وحجم المحلول الممتص في الفراغ، يرتبط معامل الإمتصاص ببنية المسامات من حيث أبعادها وتوزيعا.[2]

تختلف كمية الماء الممتصة من طرف الحجارة بحسب الرطوبة النسبية للجو، حيث ترتفع كمية الرطوبة الممتصة كلما إرتفعت الرطوبة النسبية والعكس صحيح، ويمكن قياس كمية الماء الموجودة في الحجارة من خلال حساب الفرق بين وزن المادة في حالتي التشبّع والجفاف، وعادة ما يعبّر عنها بالنسبة (W) التي تحسب كما يلي:[3]

$$\mathbf{W}\ Z\ \mathbf{m_{eau}} / \mathbf{m_{sec}}\ Z\ \mathbf{m_{humide}} - \mathbf{m_{sec}} / \mathbf{m_{sec}}$$

$\mathbf{m_{eau}}$: كتلة الماء الموجود داخل المادة.

$\mathbf{m_{sec}}$: كتلة المادة في الحالة الجفاف.

$\mathbf{m_{humide}}$: كتلة المادة في حالة الرطبة.

[1] Mosquera (M) & al, Op.cit., pp.185–194
[2] Karaca (Z), Op.Cit., pp.786–790
[3] Ibid.

ويتم تحديد درجة التشبّع (S_r) التي تعبّر عن الحالة المائية للحجارة بين حالة الجفاف وحالة التشبّع التام حسب العلاقة التالية:[1]

$$\mathbf{S_r \; Z \; W / W_{sat}}$$

يمثل (W_{sat}) نسبة الماء التي تؤدي إلى تشبع تام للمسامات، فإذا إعتبرنا أن حجم الماء المتغلغل يساوي حجم المسامات الإجمالي فإن:[2]

$$\mathbf{W_{sat} \; Z \; d_{eau} / d_{a} \, . \, N_{total}}$$

$\mathbf{d_{eau}}$: الكتلة الحجمية للماء.

$\mathbf{d_{a}}$: الكثافة الظاهرية للمادة في الحالة الجافة.

$\mathbf{N_{total}}$: المسامية المفتوحة.

بين الجفاف والتشبّع التام، يمكن للحجارة أن تكون في درجات مختلفة من التشبّع، فبالإضافة إلى الرطوبة النسبية للجو تلعب خاصية الإستطراب دورا كبيرا في تحديد كمية الرطوبة الموجودة في الشبكة المسامية للمادة.[3]

V-2-4 التحليل العنصري الكيميائي:

يحدّد هذا النوع من التحليل توزيع العناصر الكيميائية الخاصة بالمادة المقوية والتي لا تدخل ضمن العناصر المشكلة للحجارة المعالجة، حيث أن تحليل سلسلة من الطبقات تمكّن من تحديد عمق التغلغل، فعلى سبيل المثال فإن مادتي البولي إيريثان والإيبوكسي يحدّد إنتشاهما عنصر الآزوت (N).[4]

[1] Karaca (Z), Op.Cit., pp.786–790
[2] Ibid.
[3] Beck (K), Op.Cit., p.73
[4] Casadio (F) & Toniolo (L), "*Poymer treatments for stone conservation: methods for evaluating penetration deph*", in JAIC 43 (2004), pp.03-21

V-2-5 التفاعل مع الحمض:

هذه الطريقة خاصة بالحجارة الكلسية، بحيث تغمر الحجارة المعالجة في حمض الكلوروهيدريك (HCl) بتركيز 5%، وتعتبر الأجزاء غير المذابة أجزاءا تغلغلت فيها المادة المقوية وتستعمل هذه الطريقة في حالة تطبيق مواد عضوية كالراتنج أو مواد ذات هيكل من السيليسيوم، ولكن تعتبر هذه الطريقة تقريبية ونتائجها غير دقيقة، إلى جانب أنه من غير الممكن تحديد تركيز المقوي حتى تصبح الحجارة مقاومة للحمض، طبق هذه الطريقة الباحث "دوماسلوسكي" سنة 1971 والباحث "لوين" سنة 1981.[1] إلا أن هذه الطريقة لا يمكن تطبيقها على التحف الأثرية لأنها مدمّرة للعينة، فإذا تعلّق الأمر بموقع أثري فإنه بالإمكان إستعمال عينات حجرية.

V-2-6 بخار اليود:

قام الباحثان "كومار" (Kumar) و"جينال" (Ginell) سنة 1997 بدراسة تقوم بتعريض الحجارة الكلسية المعالجة بالمادة المقوية لبخار اليود، ويتم بعدها تحديد عمق التغلغل بالعين المجردة، هي طريقة بسيطة بتجهيز غير مكلف، لكن النتائج المتحصل عليها غير دقيقة.[2]

تعرّض طبقات رفيعة من الحجارة لبخار اليود وتهدف هذه العملية للتأكد من وجود مواد عضوية في العينات المدروسة، تتلوّن المواد العضوية باللون الأصفر أو البني بعد إمتصاصها لبخار اليود، وإنطلاقا من هذه الخاصية يتم تحديد تغلغل المادة المقوية العضوية، بحيث يمتص المقوي بخار اليود فيتغيّر لونه ومنه يمكن تحديد مدى إنتشاره وتغلغله في الحجارة المعالجة، لكن يجب التأكد من أن المادة المقوية تصلبّت بشكل تام، ففي حالة ما إذا كان المذيب لم يتبخر تماما فإنه بدوره يتلوّن بفعل بخار اليود بصفته مادة عضوية مما يؤدي إلى إعطاء نتائج غير صحيحة عن مدى فعالية العلاج.[3]

---

[1] Tobasso (L), Op.Cit., pp.211-224

[2] Kumar (R) & Ginell (W), "*A new technique for determining the depth of penetration of consolidants into limestone using iodine vapor*", in JAIC 36 (1997), pp.143-150

[3] Ibid.

V-2-7 الملوّنات:

تستعمل ملونات وهّاجة (Fluorescents) لتحديد أجزاء الحجارة التي طالها العلاج، كان الباحثين "قوليكوف" (Golikov) و"خاريكوف" (Zharikov) أول من إستعمل هذه الطريقة في مجال صيانة الحجارة سنة 1990، وتم تجريب محلول الرودامين ب (Rhodamine B) وهي عبارة عن مادة عضوية مشكّلة أساسا من الفليورون (Fluorone) ($C_{13}H_8O_2$)، لكن هذا الملوّن لا يمكن إستعماله إلا في حالة تطبيق رانتج إيبوكسيدي، ويمكن تحديد عمق التغلغل من خلال الوهج التي يتم مشاهدته تحت أشعة ما فوق بنفسجية، أما بالنسبة لباقي المقويات فإن هذه الطريقة غير فعالة.[1]

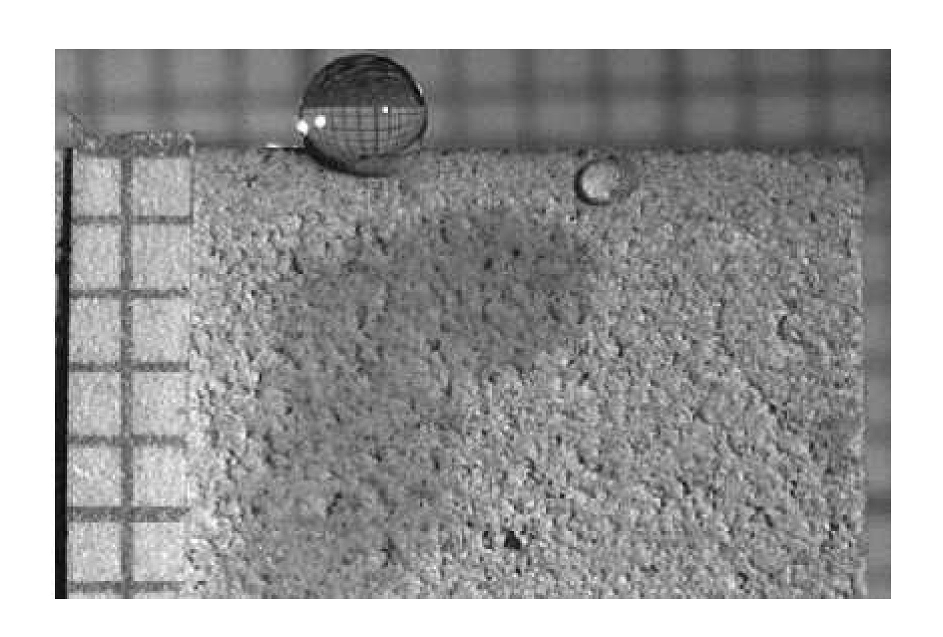
V-2-8 قابلية التبلّل:

فعندما ينتشر السائل ويتوزع على سطح صلب نقول أن هذا السطح جاذب للرطوبة (Hydrophile)، أما في حالة عدم إنتشاره بطريقة متجانسة وكاملة نقول حينها أن السطح عازل للرطوبة (Hydrophobe)، وتعتبر الرابطة الهيدروجينية من بين العوامل الأساسية التي تتحكم في هذه الظاهرة، ويظهر تأثير هذه الرابطة من خلال الضغط السطحي للسائل، والذي يمكن فهمه من خلال حركة جزيئات الماء التي تنجذب فيما بينها، حيث أن كل جزيء من الماء يتعرّض لنفس قوة الجذب في جميع الإتجاهات، أما في الطبقة الخارجية للسائل فالأمر مختلف، وذلك بسبب إنخفاض كثافة الوسط الغازي، مما ينتج عنه إنجذاب الجزيئات السطحية للماء نحو مركز السائل، ولتحديد قابلية تبلّل سطح ما يتم وضع قطرات من ماء ملوّن على سطح الحجارة المعالجة لمراقبة مدى تغيّر عازلية السطح للرطوبة، فإذا تشكّلت قطرات بزاوية تماس صغيرة فهذا دليل على أن السطح غير قابل للتبلّل نتيجة تغلغل المادة المقوية، وهي طريقة بسيطة لكنها غير دقيقة وتستعمل فقط في الحالات التي تكون فيها المقويات موادا عازلة للرطوبة.[2]

---

[1] Casadio (F) & Toniolo (L), Op.Cit, pp 03-21

[2] بدرالدين بلعبيود، « حماية سطح الحجارة الأثرية من الرطوبة»، مجلة آثار العدد 10 2013، ص 293-300



الصورة رقم 39: سطح حجارة رملية غير قابل للتبلل بعد تطبيق سيليكات الإيثيل
(Casadio (F) & Toniolo (L) 2004)

تتشكل الرانتجات أساسا من ذرات الكربون والهيدروجين اللذين لهما إلكتروسلبية متقاربة، فعند تشكيل رابطة بينهما (C—H) تكون الإلكترونات المشتركة موّزعة بشكل متجانس بين الذرتين، لذا فإنه لا يتكوّن أي قطب كهربائي في المجموعة، نفس الشيء يحدث عند إرتباط ذرتين من الكربون (C—C)، تسمى المواد الذي يكون فيها هذا النوع من الروابط الكيميائية بالمواد غير القطبية ويكون سطحها عازل للرطوبة، هذا الأخير لا يمكنه جذب جزيئات الماء لأنه من غير الممكن تشكيل روابط هيدروجينية معها، لذا نلاحظ أن جزيئات الماء فوق هذا السطح تنجذب نحو بعضها البعض مشكلة قطرات كروية عوض الإنتشار على السطح.[1]

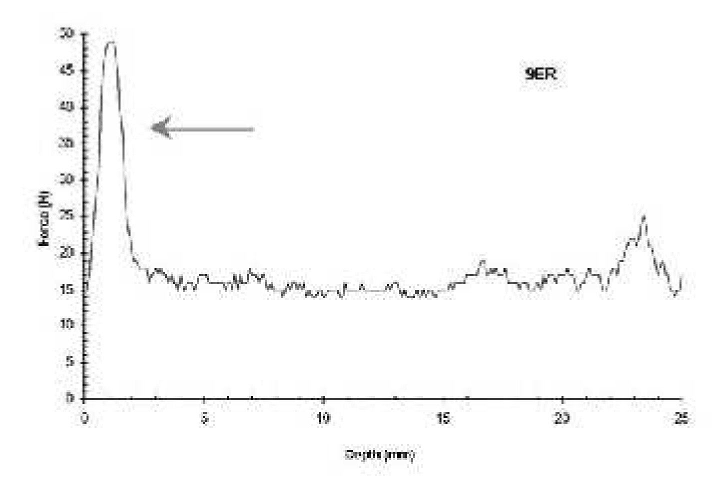
V-2-9 قياس المقاومة المادة للثقب الدقيق:

يؤدي فقدان تماسك الحجارة إلى خفض لخصائصها الميكانيكية ومقاومتها، هذا الإختلال في الخصائص عادة ما يكون في الطبقات السطحية وعلى إمتداد سمك رفيع، تقوم طريقة قياس مقاومة المادة للثقب الدقيق (Microperçage) بإجراء ثقوب دقيقة في عدة نقاط من سطح الحجارة بواسطة آلة مزودة برأس دوّار دقيق جدا من 1 إلى 5 ملم، هذه الآلة تكون موصولة بجهاز حاسوب يقوم بتسجيل كل المعطيات أثناء عملية الثقب،

[1] بدرالدين بلعيبود، المرجع السابق، ص ص.293-300

ويتكون النتائج على شكل بيانات تشمل متغيرين أساسين هما قوة المقاومة والعمق.[1] وتهدف هذه الطريقة لتشخيص التلف الذي يتمثل في فقدان التماسك بين العناصر الفلزية من حيث درجته وإنتشاره عموديا وأفقيا، وكذا تقييم عملية التقوية والتأكد من إسترجاع الحجارة لخصائصها الميكانيكية من خلال إعادة تماسك العناصر المشكلة للحجارة.





الصورة رقم 40: تطبيق إختبار مقاومة الثقب الحجارة بإستعمال جهاز مثقاب دقيق.

الشكل رقم 17: منحنى بياني سجل مقاومة الحجارة لقوة الثقب

قمة المنحنى (50 نيوتن) في عمق 2 ملم عبارة عن طبقة من الترسبات الصلبة

(Delgado Rodrigues (J) 2002)

---

[1] Delgado Rodrigues (J), «*Tracing of decay profiles and evaluation of stone treatments by means of microdrilling techniques*», in Journal of Cultural Heritage 3 (2002), pp.117–125

V-2-10 تقنية الرنين المغناطيسي النووي (RMN)

هذه التقنية الحديثة أدخلت في مجال صيانة المادة الأثرية سنة 2000 من طرف الباحث "جيورجي" (Giorgi)، تستعمل هذه التقنية لتحديد توزيع المادة المتغلغلة في الحجارة المعالجة ما يمكّن من تحديد إنتشار وتوزيع المادة المقوية، في السنوات الأخيرة قام العديد من الباحثين ومن خلال هذه الطريقة بمحاولات لوضع خرائط توزيع المادة المقوية داخل الشبكة المسامية.[1]

V-2-11 التصوير المقطعي بإستعمال الأشعة السينية:

أظهرت دراسات حديثة إمكانية إستعمال تقنية التصوير المقطعي بإستعمال الأشعة السينية (Tomographie à rayons X) لتحديد عمق تغلغل المقويات، تقوم هذه الطريقة على إضافة عامل تباين (مؤشّر) عادة ما تستعمل مادة اليود التي تذاب في محلول المونومير، ويمكن من خلاله تتبّع إنتشاره داخل العينة تحديد عمق تغلغل المادة المقوية، تعتمد هذه التقنية على التصوير الإشعاعي الذي يؤخذ من كل زوايا العينة بزاوية 180° أو 360° بحسب نوع حزمة الأشعة السينية المستعملة، كل تصوير شعاعي عبارة عن قياس لإمتصاص فوتونات الأشعة السينية، ومن خلال مجموع الصور الشعاعية يمكن إنشاء مقطع عرضي للعينة يمكن إعتباره خريطة فضائية يبين مدى تغلغل المقوي في العينة، وتعتبر هذه التقنية غير مدمّرة للعينة وأقل تكلفة من تقنية الرنين المغناطيسي النووي.[2]

---

[1] Casadio (F) & Toniolo (L).,Op.Cit., pp.03-23

[2] Brunetti (A) & al, «*Visualization of monomer and polymer inside porous stones by using X-ray tomography*», Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 222 (2004), pp.235–241



الصورة رقم 41: صورة مقطعية بإستعمال الأشعة السينية لعينة معالجة ب (TEOS)

(Brunetti (A) 2004)

الفصل الثالث:

تقييم فعالية مادتي التقوية

بارالويد B72 وأوروستك ACS 2001

المطبقتان على عينات من الحجارة الرملية

من موقع شالة الأثري

نبذة تاريخية حول موقع شالة بالرباط:

يوجد موقع شالة الأثري في الضاحية الشمالية لمدينة الرباط التي تقع على ساحل المحيط الأطلسي في الضفة الغربية وفي مصب وادي أبي رقراق، تقابلها في الضفة المقابلة مدينة سلا، أما الموقع الفلكي فالموقع الأثري يقع على خط طول 10″50 ′6° غرب خط غرينتش، وخط عرض 31″ 01′ 34° شمال خط الإستواء، أما بالنسبة للموقع الجغرافي فمنطقة الرباط تقع على الهضبة الوسطى في جانبها الساحلي، تنتمي مدينة الرباط من الناحية الإدارية إلى إقليم الرباط-سلا-زمور-زعير، يحدّ عمالة الرباط عمالة سلا شمالا وشرقا، وعمالة الصخيرات جنوبا وشرقا، وتبلغ مساحة عمالة الرباط 118 كلم².[1]

تتميّز منطقة الرباط بمناخ متوسطي بفصول متباينة، شتاء بارد وممطر تصل درجة الحرارة ليلا أحيانا إلى 0°م – 5°م وفي النهار تكون بمعدّل 17°م ، أما فصل الصيف فيتميّز برطوبة عالية بسبب تأثير المحيط وتكون معدل درجات الحرارة في حدود 30°م، وفي أيام معدودة (4 - 5 أيام) تصل درجة الحرارة إلى حدود 40°م بسبب هبوب رياح شرقية حارة، يصل معدل التساقط إلى 485 ملم في السنة (2013)، عدد الأيام الممطرة في السنة تتراوح بين 60 و75، يمكن تلخيص معدل نظام التساقط الشهري في فصل ممطر يمتد من شهر أكتوبر إلى أفريل (90 % من التساقط السنوي) وفصل جاف يمتد من شهر ماي إلى سبتمبر (10 % من التساقط السنوي).[2] كما يتميّز مناخ منطقة الرباط برطوبة نسبية مرتفعة بسبب قربها من المحيط وسد سيدي محمد بن عبد الله القريب من المدينة، فوفق معطيات لمديرية الأرصاد الجوية لمدينتي الرباط- سلا (الجدول رقم:08) نلا حظ أن أقل معدل للرطوبة النسبية لسنة 2013 كان في شهر جانفي وكان بقيمة 73.91%، بينما سجلت أعلى معدل في شهر أكتوبر بقيمة 91.81 % وهذا ما يدل على إرتفاع في الرطوبة على مدار السنة.[3] (الشكل رقم:18)

---

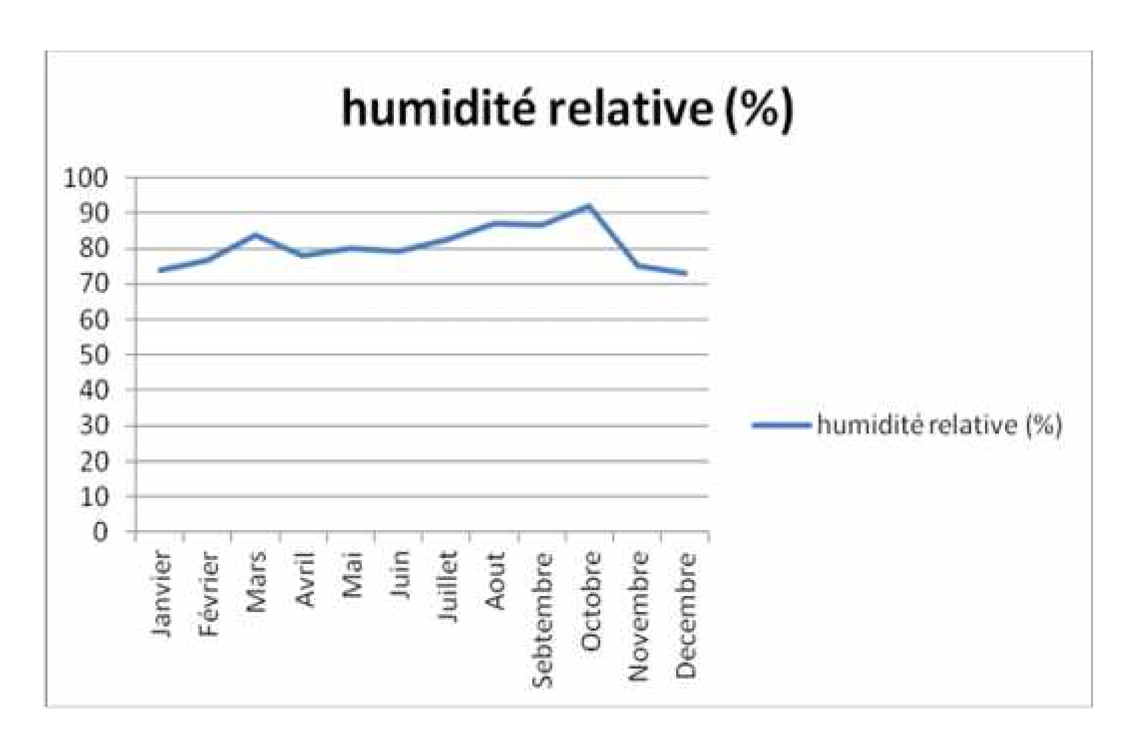
[1] Troin (J-F), *Maroc. Régions, pays, territoires*, Maisonneuve & Larose, Paris 2002, p.15

[2] معطيات مناخية خاصة بمنطقة الرباط لسنة 2013 عن مديرية الأرصاد الجوية لمدينتي الرباط- سلا

[3] نفسه

الشهر	الرطوبة النسبية %	الشهر	الرطوبة النسبية %
جانفي	73.91	جويلية	82.70
فيفري	76.93	أوت	87.06
مارس	83.82	سبتمبر	86.60
أفريل	77.91	أكتوبر	91.81
ماي	80.18	نوفمبر	75.08
جوان	79.13	ديمسبر	73.17

الجدول رقم 08: معدل الرطوبة النسبية لمنطقة الرباط لسنة 2013
عن مديرية الأرصاد الجوية لمدينتي الرباط- سلا

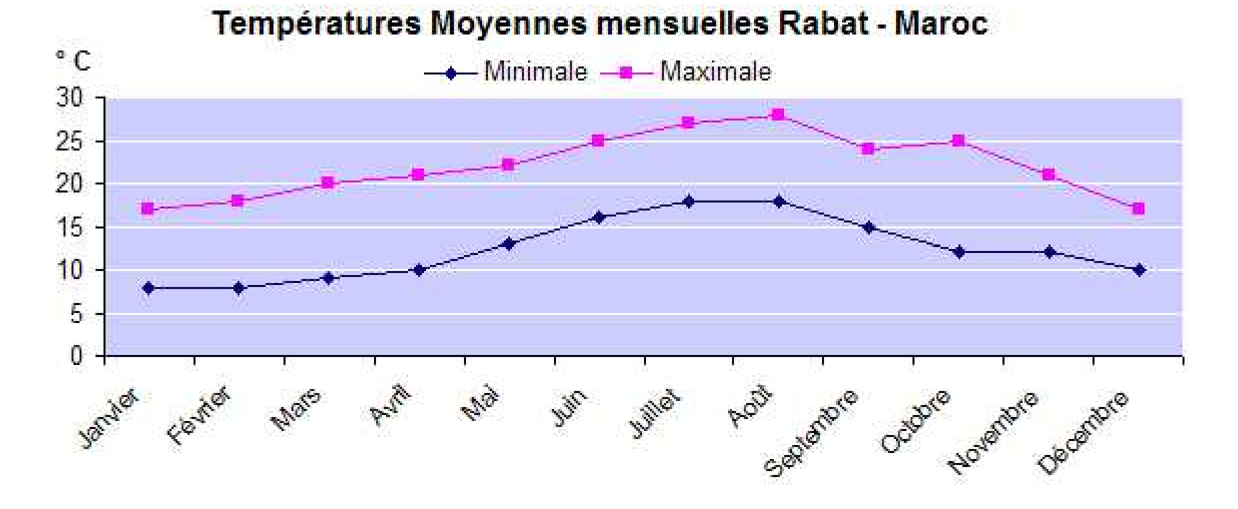


الشكل رقم 18: منحنى للمعدلات الشهرية للرطوبة النسبية لمدينة الرباط لسنة 2013

أما فيما يخص درجات الحرارة فتتميّز المنطقة بمناخ معتدل حيث تكون الدرجات القصوى في شهر أوت وتصل إلى حدود 30°م وتنخفض إلى حدود 5°م في شهر جانفي (الشكل رقم:19) وفيما يلي جدول (الجدول رقم:09) يمثل المعدلات الشهرية لدرجات الحرارة لمنطقة الرباط لسنة 2013 وفق معطيات لمديرية الأرصاد الجوية لمدينتي الرباط- سلا:

الشهر	درجة مئوية	الشهر	درجة مئوية
جانفي	10.48	جويلية	19.36
فيفري	8.90	أوت	20.55
مارس	12.42	سبتمبر	19.64
أفريل	14.22	أكتوبر	16.14
ماي	14.42	نوفمبر	14.20
جوان	15.75	ديمسبر	12.30

الجدول رقم 09: معدل درجات الحرارة لمنطقة الرباط لسنة 2013
عن مديرية الأرصاد الجوية لمدينتي الرباط- سلا



الشكل رقم 19: منحنى للمعدل الشهري لدرجات الحرارة القصوى والدنيا لمدينة الرباط لسنة 2013
عن مديرية الأرصاد الجوية لمدينتي الرباط- سلا



تعتبر شالة من بين أهم المواقع الأثرية بالمملكة المغربية وقد ساهم في نشأتها وإزدهارها موقعها الإستراتيجي عند مصب واد أبي رقراق وتوفّرها عدة عيون ومنابع، ووردت تسمية سلا منذ منتصف القرن 1 م عند بعض الكتّاب القدامى وفي بعض القطع النقدية، كما أطلق الإسم نفسه قديما على واد أبي رقراق كما ذكر ذلك "بلينيوس الكبير" (Pline le grand) وعرفت المدينة أيضا بإسم سلات، لكن خلال الفترة الإسلامية إسم سلا أصبح يطلق على المدينة التي تقع في الضفة المقابلة في حين أطلق إسم شالة على المدينة الأصلية.[1]

إنه من الصعب تحديد تاريخ نشأة سلا القديمة إلا أن موقعها يتوفر على كل المؤهلات التي تجعل منه إلى جانب مدينة ليكسوس وجزيرة موكادور إحدى أهم المحطات البحرية الفينيقية على الساحل الأطلسي، ومرّت مدينة شالة بعدة حقب تاريخية، وقد شكل موقعها على ضفة الوادي وعلى شاطئ المحيط الأطلسي نقطة جذب مهمة، حيث أثبتت الدراسات الأثرية بموقع المدينة أن الوجود البشري بها يعود إلى فترات قديمة، ففي القرن 6 ق.م أنشأ القرطاجيون مراكز للحراسة على الشاطئ الأطلسي من بينها واحدا بسلا بغرض حماية الحركة التجارية، وبعدها أقام الرومان بنفس الموقع مستوطنة سلا كمرفأ مزدهر إلى نهاية الإمبراطورية الرومانية.[2]

كشفت الحفريات في الموقع على عدة مباني تضم عددا من المعابد، بالإضافة إلى أدلة تدل على إتساع رقعة التبادلات التجارية وإرتباطها بمراكز حوض المتوسط، وأدى إزدهارها في نهاية العهد الموري إلى سك النقود بإسمها، ومع الإحتلال الروماني تم إعادة تهيئة نواة المدينة حيث تم تأسيس عدة مباني عمومية مثل الساحة العامة والمجلس البلدي والبازيليكا والكابيتول، وترجع أهمية المدينة خلال هذه الفترة لكونها شكلت حدا فاصلا بين مقاطعة نوميديا الطنجية والأراضي غير الخاضعة

[1] العيوض سيدي محمد، مدن المغرب القديم من خلال إشارات النصوص ونتائج البحث الأثري، الرباط نات، الرباط 2001، ص 142
[2] نفسه، ص 143

للإدارة الرومانية حيث كشفت الأبحاث عن سور يمتد من المحيط إلى إحدى المناطق القريبة التي تسمى واد عكراش لحماية المدينة من هجومات القبائل المجاورة.[1]

من خلال الحفريات تبيّن أن تاريخ الإستقرار يعود إلى ما بين القرن 7 و6 ق.م في حين أن تاريخ أقدم البنايات لا يتجاوز القرنين 2 و1 ق.م، وكشفت الحفريات الأولى عن مركز المدينة القديمة، ويتعلق الأمر بجزء من الساحة العامة وقوس النصر وجزئين من الشارعين الرئيسيين الأفقي والعمودي، وبناية من خمس غرف إعتبرها "لويس شاتلان" (Luis Chatelain) الكابتول، كما تم إكشفت حمامات والبازيليك.[2]

تم إكتشاف بنايات تحت المستوى الروماني وهي عبارة عن معابد ومباني عمومية وربما بعض المخازن، فقد أقيمت المباني العمومية فوق المباني البونية، كما مكّنت الحفريات من الوقوف على آثار معبدين ومباني أخرى تعود إلى القرنين 2 و 1 ق.م، أدّت حفريات "شاتلان" أيضا إلى إكتشاف دكاكين مقببة تنفتح على الشارع، كما تم إكتشاف خارج السور المريني مقابر أرّخت ما بين القرن 1 ق.م و 4 م.[3]

في نهاية القرن 4م وبداية القرن 5م أي بعد جلاء القوات الرومانية دخلت المدينة في مرحلة لا نعرف عليها الكثير، ففقدت مركزها وإزدهارها الذي دام لعدة قرون، وفي القرن 13م عادت الحياة من جديد إلى شالة ففي 1284م قام السلطان المريني أبو يعقوب يوسف ببناء مسجد وبعض الأضرحة ليجعل منها مقبرة ملكية حيث دفن فيها مع زوجته، إلا أن المدينة لم تعرف أوجّ إزدهارها إلا في عهد السلطان أبي الحسن الذي قام سنة 1339م بتوسعة المقبرة وإحاطتها بسور كبير ذو ثلاث أبواب، أما إبنه أبو عنان فقد بنى المدرسة التي تقع شمال المسجد وزيّن الأضرحة وأعادة ترميمها، وبدأت شالة تفقد شيئا فشيئا من أهميتها بعد أن أنشأ السلطان أبو عنان مقبرة جديدة للأسرة المرينية في مدينة فاس.[4]

---

[1] العيوض سيدي محمد، المرجع السابق، ص 144

[2] Chatelain (L), *Le Maroc des romains, études sur les centres de la Mauritanie antique occidentale,* Edition Boccard, Paris 1968, p.33

[3] العيوض سيدي محمد، المرجع السابق، ص 144

[4] محمد عيسى الحريري، تاريخ المغرب الاسلامي و الاندلس في العصر المريني، ط 2، دار القلم، القاهرة 1975، ص 130





الصورة رقم 43، 44: مناظر عامة لموقع شالة الأثري



الصورة رقم 45: جانب من المقبرة الملكية المرينية لموقع شالة



الصورة رقم 46: صورة جوية لموقع شالة الأثري

(google earth)

منهجية الدراسة:

بالرغم من وجود تقنيات ووسائل تحليل يمكنها تحديد فعالية أي مادة مقوية إلا أننا إعتمدنا على مناهج بسيطة يمكن لكل باحث أن يعتمدها، وراعينا في ذلك واقع صيانة وترميم في الجزائر الذي لا يزال في بداياته، صحيح أن أغلبية مشاريع الترميم ـ بالنسبة للمباني الأثرية أو المجموعات المتحفيةـ التي تقوم بها مؤسسات أجنبية تعتمد في تشخيصها على وسائل تحليل دقيقة تعتمد على تكنولوجيات حديثة وهذا ما يطلق عليه بالترميم العلمي (Restauration scientifique)، بينما تتميّز عمليات الترميم المحلية بعدم إعتمادها على التحليل المخبري بسبب عدم وجود بعض الوسائل الحديثة وحتى الوسائل الموجودة معظمها لها تكلفة باهضة نوعا ما، وغالبا ما تكون هذه التدخلات تعتمد على الخبرات والمهارات الفردية وهذا ما يمكن أن نطلق عليه الترميم الحرفي (Restauration artisanale).

إن الهدف الأساسي من الإختبارات التي قمنا بها ليس تحديد خصائص مادتي التقوية (بارالويد B72 وأوروستاك ACS 2001) التي طبقتا على العينات، لأن كل مواد التقوية لها بطاقات تقنية تحّدد من خلالها كل الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية والحرارية وذلك إنطلاقا من إختبارات وتجارب التي قامت بها المخابر المختصّة وأيضا إعتمادا على العديد من الدراسات والأبحاث في هذا المجال، إن الهدف من هذه الدراسة هو وضع منهج بسيط يعتمد عليه الباحث في عمليات التقوية والذي لا يستدعي الإستعانة بوسائل تحليل حديثة التي لا يمكن الحصول عليها في كثير من الحالات، لذا فقد إعتمدنا في مقارنة فعالية مادتين مقويتين بعد تطبيقهما على عينات من الحجارة الرملية التي أخذت من موقع شالة الأثري، هناك عدة معايير لتحديد فعالية أي علاج لتقوية الحجارة، في هذه الدراسة إعتمدنا على المعايير التالية:

- التغيّر لون الحجارة بعد تطبيق العلاج
- دراسة قابلية التبلّل للعينات المعالجة
- التغيّر في الهندسة المسامية من خلال مقارنة نفاذية العينات قبل وبعد تطبيق المقوي

بهدف دراسة فعالية المادتين المقويتين المطبقة على عينات من الحجارة الرملية إتبعنا المنهج التالي:

1- في البداية قمنا بتشخيص حالة حفظ الحجارة المشكّلة للمنشآت الأثرية، من خلال تحديد مظاهر التلف التي تتمثل بشكل أساسي في فقدان تماسك العناصر الفلزية للحجارة، وقد حاولنا تحديد آلية التلف والتفاعلات الفيزيوكيميائية التي أدت لهذا النوع من التلف، حيث تعتبر الأملاح والعوامل البيولوجة من أهم العوامل التي تؤدي إلى فقدان تماسك حجارة الموقع، وقد أرفقنا صورا لتوضيح وإبراز مظاهر التلف وأهم العوامل المسببة فيه.

2- تم تحضير عينات الدراسة التي أخذت من موقع شالة الأثري، وكان جزء من العينات موجّه لتحضير الشفرات الرقيقة (Lames Minces) من أجل الدراسة البيتروغرافية والجزء الآخر خصّ لتطبيق المادتين المقويتين وإجراء إختبارات على العينات المعالجة لتحديد فعالية علاج التقوية.

3- قمنا بتحضير شفرات رقيقة على مستوى مخبر قسم الجيولوجيا بجامعة مكناس للقيام بالدراسة البيتروغرافية للحجارة الرملية لموقع شالة، إعتمادنا على مجهر قاطب (Microscope Polarisant) من أجل تحديد أهم العناصر الفلزية المكونة لبنية الحجارة.

4- بعد إعداد عينات الدراسة قمنا بتطبيق مادتي التقوية عبر طريقة الغمر، حيث قمنا بغمر عينات الدراسة لمدة 24 ساعة في المادة المقوية وقمنا بترك عينات دون علاج من أجل مقارنة المعايير المعتمدة لتحديد الفعالية بين العينة الشاهد (غير المعالجة) والعينة المعالجة بمادة البارالويد ب72 التي أطلقنا عليها الرمز (P)، والعينة التي طبقت عليها مادة أوروستاك أ.س.أس 2001 التي رمزنا لها بالرمز (E).

5- إنطلاقا من النتائج المتحصل عليها من خلال تطبيق مادتي التقوية وإنطلاقا من معايير الفعالية التي إعتمدناها في هذه الدراسة قمنا بمقارنة النتائج بين العينتين (P) و(E) وتحليل نتائج الإختبارات من أجل تحديد فعالية المادتين على الحجارة المعالجة، لكن يبقى هذا التحديد نسبي لأنه يعتمد على عدد محدود من المعايير.

I- تشخيص حالة الحفظ حجارة الموقع:

يقع الموقع الأثري لشالة في محيط مدينة الرباط على ضفة واد بورقراق وعلى مقربة من المحيط، ما يجعله عرضة لتيارات هوائية محملة بالرطوبة والأملاح، وتعتبر الأملاح من بين أهم العوامل التي تؤدي إلى تلف الحجارة الرملية التي تشكل غالبية مواد البناء الموقع، عند أول تشخيص تبيّن لنا أن فقدان تماسك الحجارة يعد أهم مظهر للتلف الذي ينتشر على مساحات كبيرة من الحجارة. (الصورة رقم:47، 48، 49، 50)

فمن خلال تشخيصنا للموقع فإن أول ملاحظة تستوقفنا هي هشاشة نسبة كبيرة من الحجارة الرملية المشكّلة لهياكل المدينة القديمة، ففي بعض الواجهات لاحظنا تتفتّت حبيبي شديد وأحيانا إنفصال طبقات سميكة من السطح، إن حالة التلف التي يشهدها موقع شالة تستدعي تدخلا في بعض الحالات يكون إستعجاليا بسبب شدة فقدان التماسك وإمتداده في عمق الحجارة، ولعل كتشخيص أولي يمكن القول أن الأملاح هي العامل الأساسي في تلف الحجارة بحكم قرب الموقع من المحيط من جهة ومن واد ابي رقراق كمصدر إضافي للرطوبة فبالإضافة لتأثير سد سيدي محمد بن عبد الله القريب من مدينة الرباط، ما يسبب في تميّه الأملاح الموجودة في الشبكة المسامية للحجارة ما يؤدي إلى زيادة في حجمها مسببة فقدان تماسك العناصر الموجودة في الطبقات الخارجية.

بالإضافة إلى الأملاح التي تشكّل تهديدا كبيرا على المواد الأثرية المشكّلة للموقع فقد لاحظنا وجود عدة أنواع من الكائنات الحية على سطح الحجارة بسبب الوسط الملائم لتكاثرها خاصة فيما يتعلق بالرطوبة والحرارة، هذه العوامل البيولوجية ساهمت بشكل كبير في تلف الحجارة الأثرية من خلال فقدان تماسكها ومن أهم الكائنات المنتشرة على سطح الحجارة نجد الأشنات وبعض الأنواع من الطحالب. (الصورة رقم:51، 52)





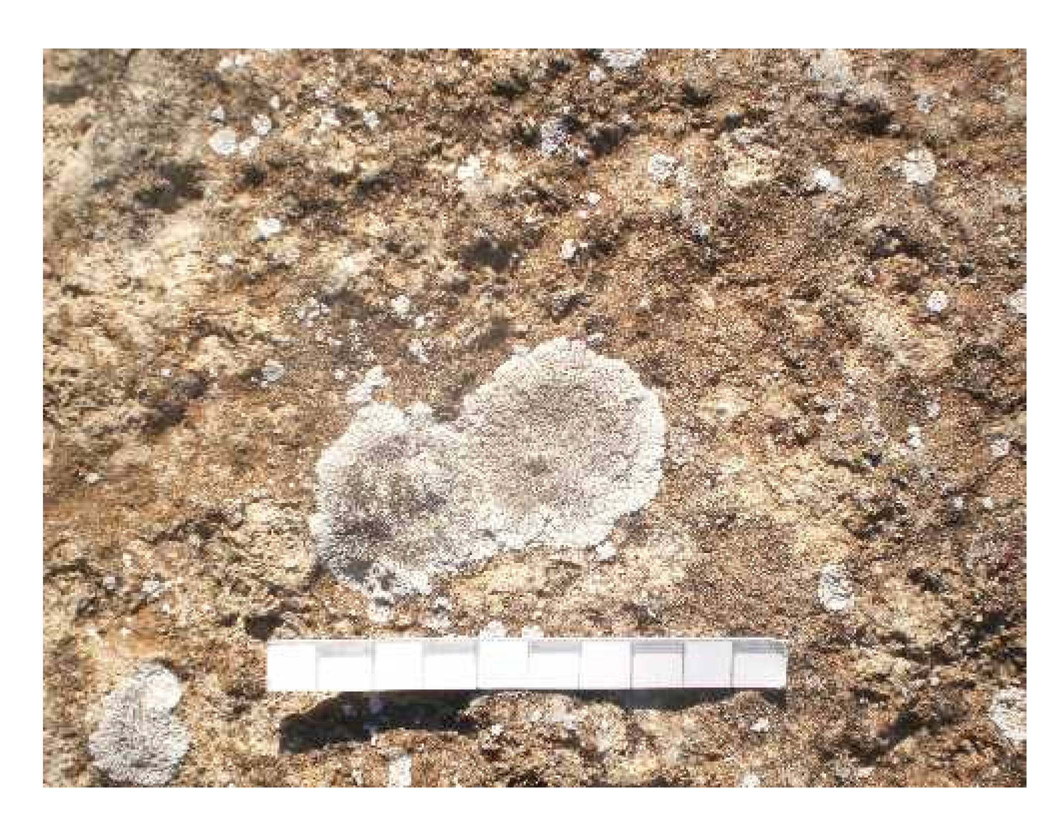
الصورة رقم 47،48: ظاهرة التفتّت الحبيبي للحجارة الرملية لموقع شالة





الصورة رقم 49، 50: ظاهرة التفتّت الحبيبي للحجارة الرملية لموقع شالة





الصورة رقم 51، 52: أشنات على سطح الحجارة الرملية لموقع شالة

II- تحضير العينات:

إن إختيار عينات الدراسة من الموقع الأثري يقوم على إختيار حجارة مشكلة للمنشآت التي تعود للفترة القديمة والتي أصيبت بفقدان تماسك عناصرها الفلزية، لأنه من غير الصحيح تطبيق مادة مقوية على حجارة سليمة لم تفقد تماسكها، فأخذنا عينات من حجارة رملية متلفة ولم نجد عناء في ذلك لأن مظهر هذا النوع من التلف واسع الإنتشار على سطح الحجارة الأثرية.



الصورة رقم 53: موضع أخذ العينات الحجرية من موقع شالة

بعد أخذ عينات من الحجارة الرملية من موقع الدراسة، قمنا في مخبر قسم الجيولوجيا بجامعة مكناس بتحضير عينات على شكل هندسي متوازي السطوح يطلق على هذه الأشكال في المخابر "قطع السكر" (Sucres) طول الضلع الأكبر 5 سم (الصورة رقم:54) وتم تقطيعها بإستعمال آلة قاطعة مخصصة لهذا الغرض (الصورة رقم:55)، تهدف هذه العملية لتحضير عينات لإستعمالها في تحضير الشفرات الرقيقة وأخرى لإستعمالها في إختبارات تطبيق المادة المقوية.



الصورة رقم 54: عينات الحجارة الرملية المحضّرة



الصورة رقم 55: آلة تقطيع الحجارة وتحضير العينات الحجرية

III- وصف بيتروغرافي:

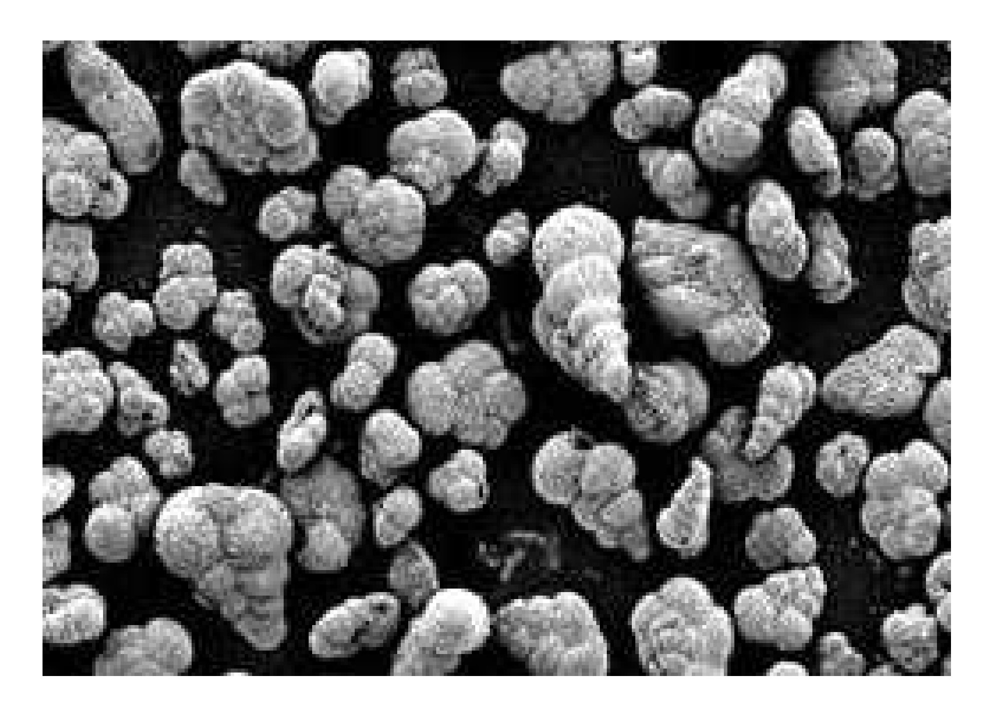
إن الحجارة الرملية عبارة عن حجارة رسوبية فتاتية (Détritique)، تنشأ أساسًا من حبات رمل إلتصقت بعضها البعض عن طريق الضغط وبواسطة فلزات أخرى، ويحتوي الرمل عادة على نسبة غالبة من الكواتز والفلسبات وفلزات أخرى، ويحتوي أحيانا هذا النوع من الحجارة على مواد عضوية وأجزاء من صخور أخرى، ويتراوح لون الحجارة الرملية بين الأصفر الفاتح والرمادي والأحمر والأخضر.[1]

لإستكمال تعريف الحجارة الرملية يجب تحديد المادة الرابطة للعناصر الفلزية تتشكّل في أغلبها من الكواتز، فتسمى حجارة رملية كلسية (Grès calcaire) إذا كان الرابط كلسي وفي الحالة التي يكون فيها الرابط من الكوارتز تسمى حجارة رملية كوارتزية (Grès gréseux) وقد تكون المادة الرابطة حديدية فتسمى عندها حجارة رملية حديدية (Grès ferrugineux).[2]

عادة ما تتشكّل الحجارة الرملية من بقايا كائنات حية ترسّبت في قيعان البحيرات والبحار، وفي أغلب الحالات تكون هذه الكائنات عبارة عن قواقع كلسية مجهرية كالمنخربات (Foraminifères) (الصورة رقم:56) وهي عبارة عن كائنات أحادية الخلية تتراوح أبعادها بين 38µ و1ملم، بينما الشعاعيات (Radiolaires) (الصورة رقم:57) فتتشكّل من هيكل من السيليس (SO_2) وتتراوح أبعادها بين 1ملم و1سم.[3] هذا ما يؤدي إلى تغيير في التركيبة البنيوية والكيميائية للحجارة الرملية خاصة فيما يتعلق بكربونات الكالسيوم الناتجة عن بقايا الرخويات والمنخربات.

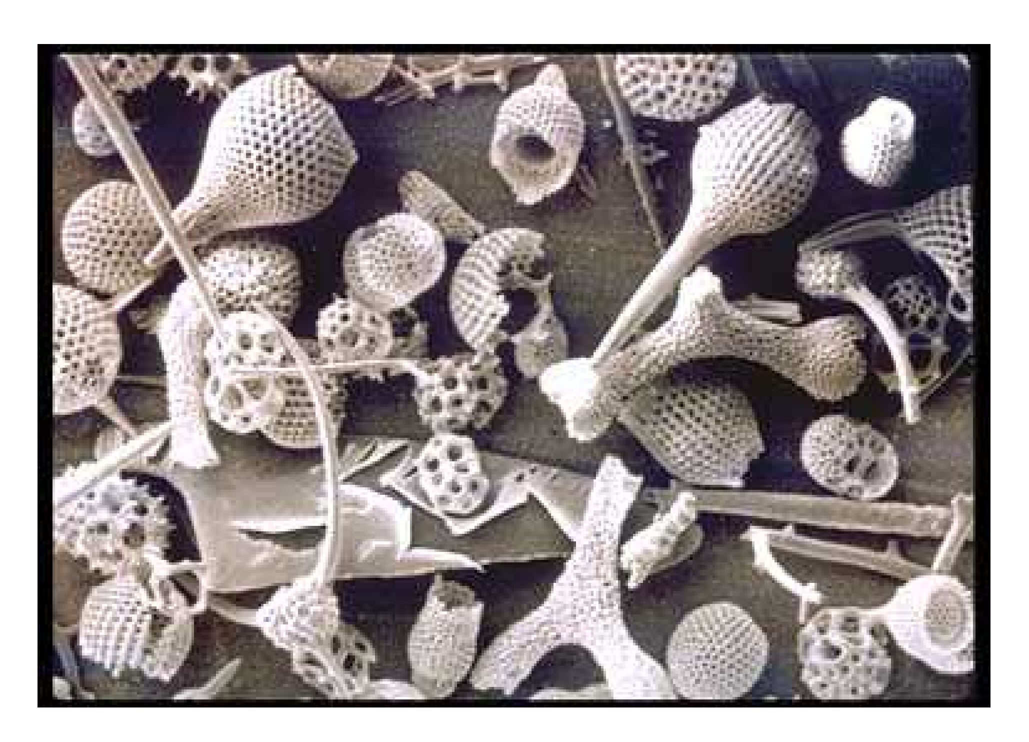
إن العينات المأخوذة من الموقع عبارة عن حجارة رملية ذات حبيبية متوسطة وتتميّز بمسامية عالية ومشكّلة من نسبة لا بأس بها من بقايا القواقع الكلسية بحكم تكوينها الرسوبي البحري، كما أن نسيج الحجارة يحتوي على عناصر سوداء عبارة عن فلز الميكا السوداء التي ينتمي بدوره إلى مجموعة السيليكات، كما تتميّز هذه الحجارة بلون فاتح ما يعطيها إمكانية كبيرة في تغير اللون بعد تطبيق المادة المقوية.

[1] Beaux (J.F) et Al, *Atlas de pétrologie*, édit. DUNOD, Paris 2012, p.102
[2] Ibid., p.103
[3] Ibid.



الصورة رقم 56: صورة مجهرية قواقع كلسية مجهرية -المنخربات-

(Beaux (J.F) et Al, 2012)



الصورة رقم 57: صورة مجهرية قواقع كلسية مجهرية –الشعاعيات-

(Beaux (J.F) et Al, 2012)

بعد أخذ عينات الدراسة من الموقع الأثري تم تقطيعها على شكل قطع سكر كما ذكرنا من قبل، في البداية قمنا بلصق العينة على قطعة زجاجية بواسطة رانتج إيبوكسي ثم قمنا بكشط العينة إلى غاية الحصول على طبقة دقيقة جدا ملتصقة بالقطعة الزجاجية، إستعملنا لهذا الغرض آلة مزودة بصحن دوّار توزع على سطحه كميات من مسحوق كاشط.*

تهدف الدراسة البيتروغرافية أساسا لتحديد الفلزات المشكّلة للحجارة ولمعرفة التركيبة البنوية للعينة المدروسة، فإذا إعتبرنا أن السيليس وكربونات الكالسيوم هي من أكثر المركبات الكيميائية التي تشكّل الحجارة الرملية بالإضافة إلى مركبات أخرى كالأكاسيد، فيجب معرفة تلائم المادة المقوية مع المركبات الحجارة من خلال الإلتحام الجيد للمقوي على سطح العناصر الفلزية، ويكون هذا الإلتحام على شكل جسور تضمن إعادة تماسك الحجارة المعالجة.

بعد تحضير الشفرات الرقيقة لعينات الدراسة قمنا بدراستها بواسطة مجهر قاطب (Mircoscope polarisant) (الصورة رقم:58) وهو عبارة عن مجهر ضوئي مزود بمصفاتين (Filtres) تسمى "نيكول" (Nicols) هما:[1]

- القاطب (Poliseur)، يكون بين مصدر الضوء والعينة.
- المحلل (Analyseur)، يكون بين العدسة العينية والعينة.

يستعمل هذا المجهر في مجال البيتروغرافيا وتحديدا في دراسة الفلزات المشكلّة للعينات، يحوّل القاطب الضوء العادي إلى ضوء مستقطب، وبعد إجتيازه للعينة يقوم المحلل بإلتقاط الأشعة الضوئية حسب إستقطابها، فتظهر الفلزات بدرجات متفاوتة من الشفافية والقتامة وأحيانا بألوان مختلفة، مما يسمح بدراسة الفلزات سواء من الناحية النوعية أو الكمية.[2]

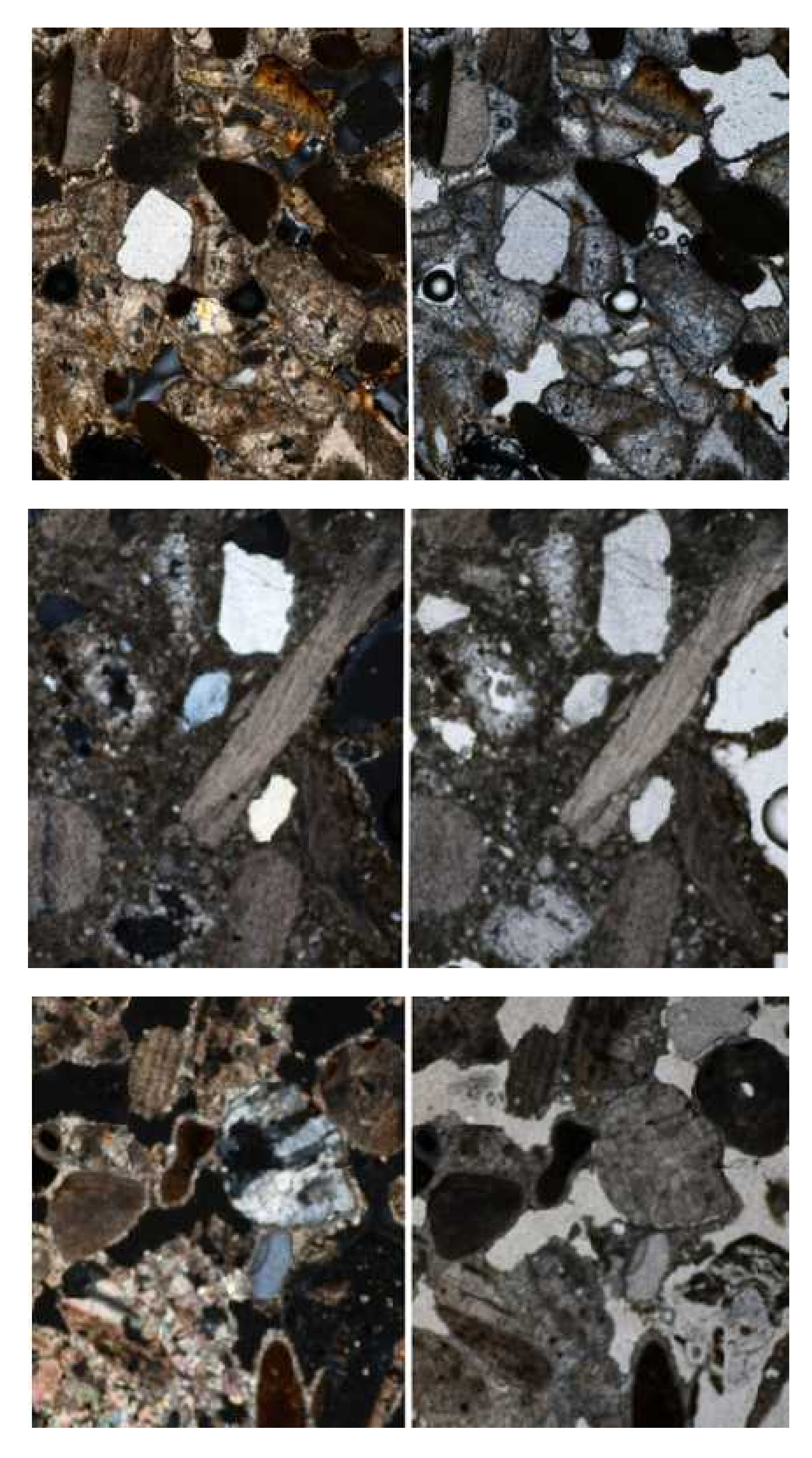
* أنظر الملحق الخاص بكيفية تحضير الشفرات الرقيقة

[1] Coutelle (J), *Détermination des minéraux au microscope polarisant*, OPU, Alger 1989, p.15
[2] Ibid., p.19



الصورة رقم 58: المجهر القاطب المستعمل في الدراسة البيتروغرافية للعينات

فإلى جانب حبات الكوارتز التي تشكّل النسبة الأكبر لنسيج الحجارة هناك عدة بقايا لكائنات حية دقيقة كبقايا أصداف الرخويات ذات القواقع كلسية دقيقة هذا ما يفسر نسبة كربونات الكالسيوم في العينات المدروسة، تشكلت الحجارة الرملية المستخدمة كمواد بناء في موقع شالة في ساحل المحيط وهذا ما يفسر وجود الكثير من بقايا من الكائنات الحية أهمها المنخربات والشعاعيات وهذا ما تؤكده الصور المجهرية للشفرات الرقيقة المحضرة إنطلاقا من عينات الدراسة، كما يلاحظ أيضا نسبة كبيرة نوعا ما من المسامات ما يفسّر المسامية العالية للحجارة الرملية المدروسة. (الصورة رقم: 59، 60، 61)



الصورة رقم 59، 60، 61: صور مجهرية بالمجهر القاطب لشفرات رقيقة للعينات

(يمين : ضوء طبيعي/ يسار: ضوء مستقطب)

IV تطبيق المادة المقوية

هناك العديد من العلامات التجارية للمواد المقوية موجودة في السوق حاليا، منها ما هو مستعمل منذ منتصف القرن الماضي كما هو الحال بالنسبة لبارالويد ب 72 الذي إستعمل في عميات التقوية منذ الخمسينيات، بالإضافة إلى مقويات تم تصنيعها وإختبارها في العديد من الدراسات ومشاريع الترميم برهنت على فعالياتها حيث إنتشر إستعمالها في عميات التقوية، ومن بين المقويات التي إنتشر إستعمالها نجد مادة أوروستاك أ.س.أس 2001 وهي عبارة عن راتنج مركب أكريليك/سيليكون.

هناك العديد من طرق تطبيق المادة المقوية، وتعلب طريقة التطبيق عاملا مهما في مدى فعالية العملية، غالبا ما يتم إستعمال طريقة الطلي بالفرشاة أو عبر طريقة الرش، في هذه الدراسة قمنا بتطبيق مادتي التقوية عبر غمر العينة في إناء صغير يحتوي على المادة المقوية مع إبقاء على عينة من دون غمر كشاهد لإجراء المقارنة، وأخترنا هذه الطريقة لضمان تغلغل جيد وللحصول على نتائج معبّرة، إستعملنا في الإختبارات نوعين من المواد المقوية:

IV -1 بارالويد ب 72:

هو عبارة عن راتنج أكريليكي على شكل حبيبات مكوّن من 70% من ميثاكريلات الإيثيل و30% من ميثاكريلات الميثيل، ولإذابة بلورات الراتنج (الصورة رقم:62) إستعملنا مادة الأسيتون كمذيب عضوي، طبقنا المادة المقوية بتركيز 4 % وهو التركيز الذي غالبا ما يطبق في عمليات التقوية، ولم نطبق تركيز أعلى لتجنب إنسداد مسامات الحجارة والتغلغل السيئ بسبب الجزيات الضخمة للراتنج والذي يتشكّل من سلاسل طويلة من البوليمير، ويعتبر التغلغل السيء من بين أهم سلبيات هذا المقوي، ويتميّز البارالويد بإرجاعية عالية حيث يطبق مذيب عضوي بواسطة قطعة قطن أو ضمادة لإعادة إذابة الرانتج الصلب، إنتشر إستعمال البارالويد كمادة مقوية في الكثير من مشاريع الترميم قبل تطبيق مقويات جديدة تتميّز بفعالية ونجاعة أكبر.



الصورة رقم 62: بلورات البارالويد ب 72

CH_3

O O

C

CH_3

H_2 C C H_2 C C

m n

C CH_3

O O

H_2C CH_3

الشكل رقم 20: شكل يمثل الصيغة الكيميائية لراتنج بارالويد ب 72

(Torraca (G) 1986)





الصورة رقم 63، 64: طريقة إذابة بلورات البارلويد ب72 في مذيب الأسيتون
توضع بلورات البارلويد في قطعة شاش وتغمر في المذيب لإذابة متجانسة

IV -2 أوروستاك أس.أس:

أوروستاك أ.س.أس 200 عبارة عن محلول لرانتج أكريليك سيليكوني في مذيب عضوي، بدأ تسويقه الفعلي خلال العشريتين الأخيرتين ويتميّز بـ:

- لزوجة منخفضة 25 ± 5 mPas في درجة حرارة 20°م ما يجعله يتغلغل بشكل جيد
- لا يؤدي إلى سد كلي للمسامات ما يسمح بحركة السوائل والغازات خلال الشبكة المسامية
- إرجاعية كبيرة بحيث يكفي تطبيق المذيب العضوي لإزالة الراتنج من المادة المعالجة
- لديه مقاومة جيدة للإصفرار التي تسببه الأشعة ما فوق بنفسجية
- يعتبر هذا المقوي عازل للرطوبة ما يوفر حماية لسطح المادة المعالجة ضد الرطوبة

تم تطبيق المادة المقوية عبر طريقة الغمر الكلي للعينة لمدة ساعتين (2 سا)، ثم تركت العينات تجف لمدة 48 سا في الشروط العادية، لاحظنا في بداية الغمر صعود فقاعات هوائية (الصورة رقم:65) بسبب تغلغل المادة المقوية في مسامات ما يؤكد أن الحجارة المدروسة تمتاز بمسامية مفتوحة عالية، تعتبر عملية الغمر الطريقة المثلى لتغلغل المادة المقوية، وطبقنا هذه الطريقة في دراستنا للتأكد من التغلغل الجيد للمقوى لتكون النتائج المتحصل نتائجا معبّرة كما ذكرنا آنفا، لكن بالمقابل قد تؤدي هذه الطريقة إلى تقوية مشبعة حيث تؤدي إلى سد الشبكة المسامية للحجارة وهي نتيجة غير مرغوب فيها.



الصورة رقم 65: صورة تبين صعود فقاعات هوائية إثر تطبيق المادة المقوية



الصورة رقم 66: صورة تبين غمر عينتين في مادة البارالويد ب 72

III-4 نتائج الإختبارات:

III-4-1 تغيّر اللون الحجارة المعالجة:

يعتبر تغيّر لون الحجارة المعالجة من أهم العوامل التي تنقص من فعالية المواد المقوية، إن هذا التغيّر يرتبط أساسا بنوع المقوي المستعمل، فهناك أنواعا من المواد المقوية المستعملة معروف عنها أنها تؤدي لتغيير في لون الحجارة كما هو الحال بالنسبة لـ (TEOS)، ولكن ترتبط هذه الظاهرة أيضا بشكل وثيق بطبيعة الحجارة المعالجة، فغالبا عندما تكون الحجارة ذات لون فاتح فإن إمكانية تغيّر لونها بعد العلاج تكون أكبر مقارنة بالحجارة ذات اللون القاتم.

إن عينات الدراسة عبارة عن حجارة رملية تتميّز بلون فاتح راجع إساسا لوجود مواد كلسية فتاتية في نسيجها، لذا توقعنا قبل تطبيق العلاج إمكانية في تغيّر لونها، فبعد جفاف العينات ومقارنتها بالعينة غير المعالجة تبين لنا تغيّر في لون العينتين المعالجتين، خاصة التي عولجت بمادة أوروستاك فقد تغيّر لونها بشكل واضح وأصبحت داكنة اللون، أما التي غمرت بمادة البارالويد فقد تغيّر لونها لكن بنسبة ضئيلة جدا.



الصورة رقم 67: صورة تبين تغيّر لون العينات المعالجة بالمادتين المقويتين

III-4-2 قابلية التبلل:

تعتبر خاصية قابلية التبلّل من بين المعايير التي تراعى في إختيار المواد المقوية، فعازلية المادة للرطوبة تعطى حماية إضافية للحجارة من خلال التقليل من تأثير الماء على المادة الأثرية، بالإضافة تمكننا هذه الظاهرة من تتبع إنتشار وتغلغل المادة المقوية -إذا كانت عازلة للرطوبة- في الحجارة المعالجة، إن هذه الطريقة وبالرغم من بساطتها فهي تمكن من تحديد عازلية سطح الحجارة المعالجة من جهة كما هو الحال في الإختبار الذي قمنا به على عينات الدراسة، كما تمكننا هذه الطريقة أيضا في تتبع ولو بطريقة غير دقيقة في مدى إنتشار وتغلغل المادة المقوية في نسيج الحجارة، ولإختبار عازلية المادتين المطبقتين للرطوبة قمنا بوضع قطرات من الماء على سطح العينات، فلاحظنا ما يلي:

- العينة الشاهد (T): عند تطبيق قطرة ماء بواسطو أنبوب التقطير على سطح الحجارة التي تمثل العينة الشاهد، لاحظنا إنشارا كليا لقطرة الماء بزاوية تماس كبيرة جدا ما يدل على قابلية كبيرة للتبلّل للسطح. (الصورة رقم:68)



الصورة رقم 68: إختبار قابلية التبلّل بالنسبة للعينة الشاهدة (T)

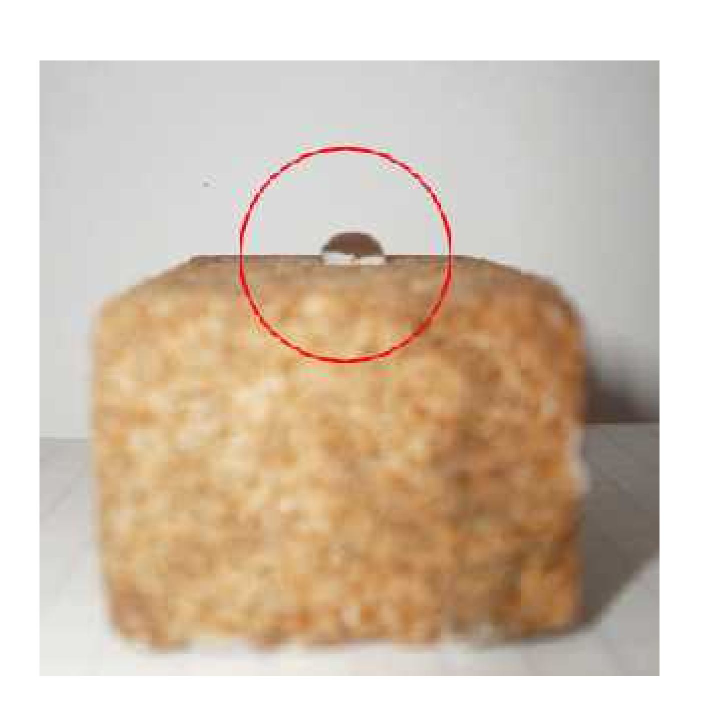
- العينة المعالجة بالبارالويد ب72 (P): إنتشار قليل لقطرة الماء بزاوية تماس في حدود بين 100° و110° وهذا ما يدل على إنخفاض في قابلية تبلّل السطح مقارنة بالعينة غير المعالجة -العينة (T)-، ومع ذلك فإن السطح لم يفقد قابلية التبلّل بشكل تام. (الصورة رقم:69)



الصورة رقم 69: إختبار قابلية التبلل بالنسبة للعينة (P)

- العينة المعالجة بأوروستاك (E): عدم إنتشار قطرة الماء على سطح العينة، وحددت زاوية التماس بأقل من 90° ما يدل على قابلية صغير جدا لتبلّل السطح ما يجعل سطح العينة عازلا للرطوبة بشكل كبير مقارنة بالعينة التي طبقت عليها مادة البارالويد ب72. (الصورة رقم:70، 71)





الصورة رقم 70، 71: إختبار قابلية التبلل بالنسبة للعينة (P)
عدم إنتشار قطرة الماء على السطح (قابلية تبلّل ضعيفة)



الصورة رقم 72: مقارنة قابلية التبلّل بالنسبة للعينات الثلاث

(T): قابلية عالية للتبلل

(P): قابلية متوسطة للتبلل

(E): قابلية ضعيفة للتبلل

III-4-3 النفاذية:

من أجل مقارنة نفاذية العينات قمنا بإستعمال محلول ملوّن ليسهل علينا ملاحظة وتتبع نفاذه وإنتشاره في الشبكة المسامية للعينات الحجرية، في البداية قمنا بتحضير إناء صغير وضعنا فيه محلول ملوّن بمستوى 2 ملم، ثم وضعنا العينات الثلاث في نفس الوقت، وخلال مدة التجربة حافظنا على مستوى المحلول الملّون-أي 2 ملم- من خلال ضخ مستمر للمحلول في الإناء خاصة بالنسبة للعينات التي كانت فيها النفاذية عالية، قمنا بتسجيل مدى نفاذية المحلول الملوّن وتغلغله في العينات الثلاث، وقمنا بتسجيل الملاحظات في مدّات زمينية ثلاث: بعد 5 دقائق، 33 دقيقة، 45 دقيقة من بداية الإختبار.

- بعد 5 دقائق من بداية الإختبار لاحظنا تغلغل سريع للمحلول الملوّن بالنسبة للعينة الشاهد (T) وبنسبة أقل للعينة المعالجة بمادة البارالويد (P)، أما بالنسبة للعينة الثالثة (P) فإن المحلول لم يتجاوز حد مستوى المحلول في الإناء. (الصورة: 73، 74)





الصورة رقم 73، 74: إختبار النفاذية على العينات الثلاث (بعد 5 د)

- بعد 30 د إستمر تغلغل المحلول تقريبا بنفس الوتيرة بالنسبة للعينة الشاهد (T) حيث وتجاوز مستوى النفاذية منتصف العينة، بينما تضائلت سرعة الحركة بالنسبة للعينة (P)، أما بانسبة للعينة (E) فلن يتغير مستوى المحلول سوى بقيمة صغيرة جدا. (الصورة رقم: 73، 74)





الصورة رقم 75، 76: إختبار النفاذية على العينات الثلاث (بعد 30 د)

- بعد 45 د عبر المحلول الملوّن كل العينة (T)، بينما استمر تصعّد المحلول في العينة (P) بوثيرة ضعيفة ووصل مستوى منتصف العينة، أما بالنسبة للعينة (E) فإن مستوى مستوى التغلغل لم يتغيّر. (الصورة رقم: 77، 78)





الصورة رقم 77، 78: إختبار النفاذية على العينات الثلاث (بعد 45 د)

III- تحليل نتائج الإختبارات:

هناك عدة طرق تستعمل في تقييم فعالية عملية تقوية الحجارة الأثرية كما ذكرنا ذلك في الفصل الثاني، في هذه الدراسة إعتمدنا على بعض الطرق البسيطة والتي تكون في متناول الباحثين الذين لا تتوفر لديهم الوسائل والتكنولوجيات الحديثة، فإعتمدنا في تقييم العلاج ومقارنة مدى فعالية المادتين المقويتين المطبقتين (بارالويد وأوروستاك) على تغيّر لون الحجارة وظاهرة قابلية التبلّل والنفاذية بالإضافة إلى مقارنة بعض الخصائص الميكانيكية ولو بشكل نسبي، الجدول التالي يلخص المعايير المعتمدة في هذا البحث من خلال تغيّر هذه المعايير بالنسبة للعينتين المعالجتين (E) و(P) مقارنة بالعينة الشاهد (T) :

معايير الفعالية	العينة E	العينة P
اللون	تغير كبير	تغير غير معتبر
المسامية	إنخفاض كبير	إنخفاض ضئيل
النفاذية	إنخفاض كبير	إنخفاض ضئيل
قابلية التبلّل	ضعيفة جدا	متوسطة
خصائص ميكانيكية	تحسين معتبر	تحسين ضئيل

الجدول رقم 10: معايير فعالية عملية التقوية بالنسبة للعينات الثلاث

إن الهدف الأساسي لعملية التقوية هي إعادة تماسك وإرتباط العناصر الفلزية للحجارة التي فقدت تماسكها وتهدف أيضا إلى محاولة إسترجاع الخصائص الأصلية للحجارة، لكن الكثير من التدخلات تؤدي إلى تغيير في بعض خصائص الحجارة المعالجة بدرجات متفاوتة، هذه التغيرات منها ما يكون إيجابي ويرفع من حمايتها، وهذه التغيرات الإيجابية يمكن إعتبارها من بين معايير فعالية التدخل.

من خلال الجدول وإعتمادا على المعايير المعتمدة نلاحظ أن مادة أوروستاك ACS 2001 يمكن إعتبارها أكثر فعالية مقارنة بمادة بارالويد B72 في بعض المعايير، حيث أنها خفّضت من مسامية المادة ونفاذيتها لمنع حركية الماء وما ينجرّ عنه من إنتقال الأملاح القابلة للذوبان وإمكانية التجمّد، كما أن عازلية المادة للرطوبة يعطيها مقاومة أكثر بمنع تلف السطح وإعادة فقدان تماسكه بفعل مختلف التفاعلات التي يكون الماء عنصرا أساسيا فيها، لكن التغيّر الواضح للون الحجارة يعتبر عائقا أساسيا لإستعمال هذا النوع من العلاج خاصة بالنسبة للحجارة ذات اللون الفاتح كما هوالحال بالنسبة للحجارة الرملية المدروسة، أما بالنسبة للعينة (P) لم يكن اللون من بين السلبيات بالعكس فإن التغيّر القليل للون الحجارة بعد العلاج يعتبر من معايير فعالية هذا النوع من مواد التقوية، لكن بالمقابل لم يحسّن هذا التدخل من خصائص الحجارة المعالجة.

أظهرت الإختبارات التي قمنا بها مدى التغيّر المعتبر في خصائص الحجارة عند تطبيق مادة أوروستاك ACS 2001، وتكمن هذه التغيرات فيما يلي:

1- تغيّر واضح في اللون حيث أصبحت الحجارة قاتمة ما أدى إلى تغيير في مظهر للحجارة، ويكون الإشكال أكبر إذا تم معالجة مناطق محددة من سطح الحجارة، فينتج حينئذ تعاقبا للون الأصلي واللون القاتم خاصة إذا كانت الحجارة المعالجة ذات لون فاتح.

2- إنخفاض كبير في المسامية ما إنجر عنه إنخفاض كبير جدا في نفاذية الحجارة، إن العينات المدروسة عبارة عن حجارة رملية تمتاز بمسامية عالية ساهمت في تغلغل سهل وعميق للمادة المقوية ما أدى إلى إنسداد شبه تام للمسامات وهذا ما يفسّر عدم تغلغل ونفوذ المحلول الملوّن حتى بعد 45 د، فبعض الباحثين أوصى بهذه الحالة للتقليل من خطر بعض العوامل كحركة الماء في الشبكة المسامية وما يسببه من إنتقال للأملاح وتبخّر، إلا أن هذه الحالة من إنسداد المسامات قد تشكلا خطرا حقيقيا على المادة الأثرية المعالجة، فقد يحتبس

الماء الذي ينتقل من المناطق غير المعالجة في العمق فللوصول إلى السطح يجب على الماء الإنتقال عبر الطبقات المعالجة أين سيتجمّع ويحتبس في هذه المنطقة مشكلا تهديدا على الطبقات الخارجية للحجارة خاصة في المناطق الباردة حيث يتجمد هذا الماء ما يؤدي إلى إنفصال في الطبقات الخارجية.

3- تحسين الخصائص الميكانيكية للحجارة الذي يعتبره بعض الباحثين من بين معايير الفعالية، إلا أن هذا التغيير في كثير من الحالات يؤدي إلى تلف الحجارة المعالجة على المدى البعيد بسبب إختلال في معامل التمدد الحراري بين مناطق الحجارة السليمة والمعالجة ما يؤدي إلى حدوث شقوق وتصدعات بسبب التباين في التمدد والتقلص الحراري، ويطرح هذا الإشكال خاصة بالنسبة للحجارة المعرضة لأشعة الشمس.

4- إنخفاض كبير في قابلية تبلل السطح بفعل خاصية عزل الرطوبة للمادة المقوية هذا قد يحمي الحجارة من تغلغل الماء وانتشاره على السطح ما يعطي للسطح مقاومة أكثر للعوامل البيولوجية التي غالبا ما تستوطن وتتكاثر على السطح الرطب

أما فيما يخص العينة (P) فلم تطرأ عليها تغيرات معتبرة فيعزى ذلك بشكل أساسي إلى التركيز المنخفض للمادة المقوية، فبالرغم من حجم الجزيئات الضخمة المشكلة لبوريمير البارالويد إلا أنه تغلغل بشكل جيد وهذا راجع الى أبعاد المسامات الكبيرة للحجارة الرملية المدروسة، لأن هذا النوع من المقويات تعتبر غير ناجعة إذا ما طبقت على حجارة ذات المسامات صغيرة، بالإضافة فإن طريقة الغمر تعطي إمكانية كبيرة للتغلغل العميق، وبالنسبة لمعيار اللون يمكن القول أن مادة بارالويد B72 أكثر فعالية مقارنة بمادة أوروستاك ACS 2001، إذ أن لون العينة لم يتغيّر بشكل معتبر إذا ما قورن بلون العينة الشاهد (T).

إذا أردنا تقييم فعالية المادتين بارالويد B72 وأوروستاك ACS 2001 إنطلاقا من المعايير التي أخذناها بعين الإعتبار وبعد النتائج المتحصّل عليها يمكن القول أن لكل من المادتين إيجابيات وسلبيات، لذا فلا يمكن الفصل في فعالية ونجاعة أحد المقويين، فإذا أخذنا معيار اللون فنجد أن مادة بارالويد B72 أكثر فعالية وبشكل كبير من مادة أوروستاك ACS 2001، أما فيما يخص التغيّر في الهندسة المسامية وما يرافقها من تغيّر في الخصائص المرتبطة بها كالنفاذية فإن حالة الإنسداد شبه الكلي للعينة (E) هي حالة لا ينصح بها، فالحالة الأمثل في تشكّل جسور من المادة المقوية تربط العناصر الفاقدة لتماسكها من دون تغيير كبير في المسامية وهي الحالة الخاصة بالعينة (P)، معيار آخر وهو عازلية الرطوبة التي توفره مادة أوروستاكACS 2001 التي أعطت قابلية تبلّل ضعيفة جدا لسطح العينة (E) ما يعطي للمادة المطبقة فعالية أكبر مقارنة بالعينة المعالجة بمادة بارالويد B72، لو قارنا العينتين المعالجتين لوجدنا أن العينة (E) تحسنت بعض خصائصها الميكانية وأصبح سطحها أكثر مقاومة لظاهرة فقدان التماسك عكس العينة (P) التي لم يطرأ عليها تغيير معتبر.

كخلاصة لإختبار فعالية المادتين بارالويد B72 وأوروستاك ACS 2001 المطبقتين على عينات من الحجارة الرملية المأخوذة من موقع شالة الأثرية، ووفق المعايير التي إعتمدناها في هذا البحث يمكن أن نستنتج أن لكل من المقويين فعالية عالية فيما يخص بعض معايير، فمادة أوروستاكACS 2001 تمتاز بفعالية جيدة فيما يخص التغلغل الجيد والمتجانس إلى جانب عازلية سطح الحجارة للرطوبة وكذا تحسين بعض الخصائص الميكانيكية للحجارة المعالجة، بينما تظهر فعالية مادة بارالويد B72 أساسا في عدم تغيّر لون الحجارة المعالجة بالإضافة إلى عدم تغيير معتبر في الهندسة المسامية للحجارة وكذا النفاذية

يبقى تقييم العلاج المطبق نسبي نظرا لعدد ونوع معايير التقوية التي إعتمدناها، إلا أن هذا التقييم يمكن إعتماده خلال عمليات التقوية في حالة ما إذا لم تتوفر لنا مناهج ووسائل التي يمكن من خلالها أن نقيّم أي عملية تقوية خاصة إذا كانت هذه العملية

ضرورية ومستعجلة، فهذه المناهج في غالبها تعتمد على تكنولوجية عالية كما أن تكلفة بعضها عالية، لذا في كثير من الحالات يمكن إتخاذ معايير الفعالية : التغلغل الجيد، عدم تغيّر لون الحجارة، عدم تغيّر في الشبكة المسامية، تحسين في الخصائص الميكانية، ومن خلال الدراسة التطبيقية التي قمنا بها حاونا تقديم إختبارات بسيطة تعتمد على وسائل ومواد بسيطة يمكن أن تتوفر لأي باحث أو مختص في مجال صيانة المادة الأثرية.

الخـــــاتمة

خاتمـــة:

تتعرض المادة للعديد من العوامل الخارجية التي تشكّل محيطا ووسطا، وتسعى المادة بشكل دائم الحفاظ على توازنها ضمن هذا المحيط، وما نصطلح عليه في علم الصيانة بالتلف ما هو إلا تغيرات فيزيائية أو/و كيميائية أو/و ميكانيكية للمادة التي تسعى من خلاله لخلق نوع من التوازن والإستقرار، كما هو الحال لظاهرة فقدان تماسك العناصر الفلزية المشكّلة للحجارة، فقبل أي تدخل فإنه من الضروري معرفة وتحديد العوامل والمؤثرات التي أدت لهذا النوع من التلف، لذا فإن تحديد طبيعة وآلية التلف تعتبر ضرورية لإقتراح مادة التقوية الملائمة وطريقة تطبيقها.

في العشريات الأخيرة أصبح يعتمد تقييم فعالية التدخلات على المادة الأثرية على وسائل حديثة ودقيقة تعتمد في غالبيتها على تكنولوجية عاليا، ففيما يخص تقييم عملية تقوية الحجارة فإنه يعتمد على عدة معايير يمكن من خلالها تحديد نجاعة العملية المرتبطة بعدة متغيرات متعلقة بالمادة المقوية من جهة وأخرى متعلقة بخصائص الحجارة المعلاجة،

تمكّننا بعض المعايير من تحديد إنتشار المادة المقوية فعالية عملية تقوية وتغلغلها في الشبكة المسامية آلية التلف ودرجته ما يرفع من نجاعة وفعالية التدخّل، لكن تبقى هذه الإمكانيات عائقا بالنسبة للباحث الذي لا يملك الوسائل التقنية والمادية للقيام بهذا النوع من التحاليل والإختبارات ما يفوّت فرصة تطبيق علاج ذو فعالية أكبر، هنا تطرح إشكالية التدخل بالإمكانيات المتاحة أو التريّث حتى يمكن إستخدام وسائل وإمكانيات تؤدي لفعالية أكبر، لكن بالمقابل لا يمكن ترك المادة الأثرية تتعرض لمزيد من التلف لأن عامل الوقت في بعض الحالات يعتبر حاسما، فإذا إستطعنا الحفاظ على حالة الحفظ والتأكد من إستقرارها فإنه من الأفضل وعدم التدخل الى حين توفر الإمكانات والوسائل الملائمة خاصة فيما يتعلق بعملية التشخيص والمواد والوسائل الملائمة للعلاج.

ليس من السهل تحديد فعالية عملية تقوية الحجارة الأثرية، لأن هناك عدة عوامل تتحكم في العملية، منها ما هو متعلق بخصائص الحجارة كالمسامية التي تلعب دورا أساسيا في تغلغل وإنتشار المادة المقوية في الشبكة المسامية، وكذا التركيبة الكيميائية والفلزية لملائمتها مع تركيبة المقوي فمثلا نطبق موادا مشكلة أساسا من كربونات الكالسيوم أو الباريوم بالنسبة للحجارة الكلسية والرخام، كما نطبق في الغالب موادا مشكلة من عنصر السيلسيوم لتقوية الحجارة الرملية لتلائم كل مادة مقوية مع الحجارة المعالجة، إضافة الى الخصائص الفيزيوكيميائية للحجارة فإن خصائص المادة المقوية لها الدور الأكبر في نجاعة العلاج وفعاليته فقد عرضنا في هذا البحث أهم المواد المستعملة وخصائصها في مجال تقوية الحجارة ، كما يجب الأخذ بعين الإعتبار طريقة تطبيق المقويات بهدف تغلغل أكبر وانتشار متجانس في الشبكة المسامية للحجارة.

هناك عدة عوامل تؤثر في مدى فعالية التقوية، وفي الواقع لا يوجد علاج فعّال وخال من العيوب والسلبيات مهما بلغت فعاليته وأظهر نتائج جيدة، بالنسبة للإختبارات التي قمنا بها فلا يمكننا تقييم كلي لفاعلية المادتين المجربتين على عينات الحجارة الرملية، تبيّن لنا من خلال نتائج الإختبارات أن مادة وأوروستاك ACS 2001 تعتبر أكثر فعالية مقارنة مع بارالويد B72 في بعض الجوانب وهي:

- التغلغل الجيد بسبب جزيئاتها الصغير وللزوجة المنخفضة التي تتميّز بها ما مكّنها من التغلغل الجيد في مسامية العينة، عكس بارالويد B72 الذي يتشكّل من جزيئات ضخمة من البوليمير.
- الرفع من الخصائص الميكانيكية للحجارة المعالجة، ما يمنحها مقاومة أكبر للعوامل الخارجية.
- تصبح الحجارة المعالجة تتميّز بعازلية للرطوبة، ما يعطي لسطحها حماية جيدة للرطوبة على عكس البارلويد.

بالرغم من هذه المعايير الجيدة التي تميّز مادة أوروستاك ACS 2001 والتي تجعلها من بين مواد التقوية الأكثر إنتشارا في الأسواق خاصة إلا أنه يبقى عيبها الأساسي في تغيّر لون الحجارة، ففي الإختبارات التي أجريناها لا حظنا تغيّرا واضحا للون الحجارة الرملية ما يعيد النظر في فعالية لهذه المادة على الأقل بالنسبة لنوع الحجارة المستعملة في الإختبارات، فعندما تكون الحجارة ذات لون قاتم يكون تغيير غير معتبر اللون.

أما فيما يخص النفاذية فقد لاحظنا عدم نفاذية المحلول الملون عبر العينة (P) والسبب الأساسي لذلك هي طريقة تطبيق المادة المقوية حيث إستعملنا طريقة الغمر وهي من بين أهم الطرق التي تعطي أقصى كمية من تغلغل المادة المقوية، وبحكم اللزوجة المنخفظة لمادة أوروستاك ACS 2001 (25 mPas في درجة حرارة 20°م) وكذا جزيئاتها الصغيرة مقارنة مع الجزيئات الضخمة المشكلة لمادة بارالويد B72، للحصول على تغلغل ملائم لهذا المقوي يجب تفادي تطبيقه بإستعمال طريقة الغمر تجنبا لإنسداد المسامات كما لاحظنا ذلك من خلال التجارب، فالطريقة المثلى للتطبيق تكون عبر الرش أو الطلي بالفرشاة.

أما فيما يخص مادة بارالويد B72 فمن إيجابياتها أنها لم تغيّر لون الحجارة إلا بشكل ضئيل جدا لا يؤخذ بعين الإعتبار، كما أن هذا المقوي لم يغيّر بشكل كبير الهندسة المسامية للحجارة المعالجة مقارنة بمادة أوروستاك ACS 2001، إلا أن بارالويد B72 لم تحسّن في الخصائص الميكانيكية للحجارة كما أنها ليست مادة عازلة للرطوبة وتبقي على سطح الحجارة قابل للتبلل ولا توفر له الحماية اللازمة.

لعل النتيجة العامة للإختبارات التي أجريناها على عينات من الحجارة الرملية بتطبيق مادتي بارالويد B72 وأوروستاك ACS 2001 هي أن لكلتا المادتين فعالية نسبية وفي نفس الوقت لهما بعض السلبيات، هذا التقييم خاص بالإختبارات التي قمنا بها والتي ترتبط أساسا بـ:

- طبيعة الحجارة المدروسة وخصائصها الفيزيائية والكيميائية والميكانيكة
- درجة فقدان تماسك العناصر الفلزية المشكّلة للحجارة المدروسة
- طريقة تطبيق المادة المقوية

لا توجد موادا لتقوية الحجارة لها فعالية مثلى، كما أن الفعالية لا ترتبط فقط بالمادة المقوية، لذا فإنه لا يمكن الحديث على فعالية أي مقوي بصفة مطلقة لأن كل علاج مرتبط بخصائص الحجارة وطبيعة المادة المقوية وكذا طريقة وكيفية تطبيق العلاج، ففي بعض الحالات تكون مادة مقوية فعالة بالنسبة لتدخل ما وغير فعالة لنفس النوع من الحجارة في أحيانا تكون طريقة التطبيق، لذى فمن الأصح الحديث على فعالية العلاج وليس على فعالية المادة المقوية.

إن العلاج الأمثل في تقوية الحجارة الأثرية يتمثل في محاولة إيجاد صيغة ملائمة بين مختلف العوامل التي تتحكم في عملية التقوية، وإنطلاقا من هذا المبدأ يجب في البداية أن يكون التشخيص سليما وكفيل أن يوفر لنا جملة من المعطيات والمعلومات التي تساعدنا على إقتراح العلاج المناسب سواءا فيما يخص المادة المقوية الملائمة أو فيما يخص طريقة التطبيق المناسبة.

قائمة المراجع

قائمة المراجع:

الحريري محمد عيسى ، تاريخ المغرب الاسلامي وٙلاندلس في العصر المريني، الطبعة الثانية، دار القلم، القاهرة 1975

العيوض سيدي محمد، *مدن المغرب القديم* من خلال إشارات النصوص ونتائج البحث *الأثري*، مطبعة الرباط نات، الرباط 2001

العروي عبد الله، مجمل تاريخ المغرب، الطبعة الثانية، المركز الثقافي العربي، الدار البيضاء 2000

مراجع أجنبية:

Barbe (R), *La chimie expérimentale, chimie organique et minérale capes et agrégation de sciences physiques*, Dunod, Paris 2007

Beaux (J.F) et Al, *Atlas de pétrologie*, édit. Dunod, Paris 2012

Berducou (M.C) & al, *La conservation en archéologie,* Ouvrage collectif, Masson, Paris 1990

Betekhtine (A), *Manuel de minéralogie descriptive*, Editions MIR, Moscou 1968

Brahic & al, *Sciences de la Terre et de l'Univers*, Editions Vuibert, Paris 1999

Cailleux (A) & Chavan (A), *Détermination pratique des roches,* Société d’éditions d’enseignement supérieur, Paris 1999

Campy (M) & Macaire (J.J), *Géologie des formations superficielles,* Edition Masson, Paris 1989

Chamley (H), *Sédimentologie*, Dunod, Paris 1987

Chatelain (L), *Le Maroc des romains, études sur les centres de la Mauritanie antique occidentale*, Edition Boccard, Paris 1968

Coutelle (J), *Détermination des minéraux au microscope polarisant*, OPU, Alger 1999

Doehne (E) & Clifford (A), *Stone Conservatio: An Overview of Current Research*, The Getty Conservation Institute, Second Edition, Los Angeles 2010

Domasloswski (W), *Conservation préventive de la pierre*, Traduit par Woszyck (I), UNESCO, Paris 1982

Dupeux (M), *Aide-mémoire science des matériaux*, Dunod, Paris 2005

Eberhart (J.P), *Méthodes physiques d'étude des minéraux*, Doin éditeur, Paris 1976

Foster (R), Géologie générale, t.1, OPU, Alger 1989

Iniguez Herrero (J), *Altération des calcaires et des grés utilisés dans la construction*, Traduit par Stichelbaudt (J), Editions Eyrolles , Paris 1967

Jung (J), *Précis de pétrographie*, Edition Masson, Paris 1996

Kireev (V), *Cours de chimie physique*, Traduit par Golovanoff (A), Edition MIR, Moscou, 1968

Komar (A), *Eléments et matériaux de construction*, Edition MIR, Moscou 1969

Lazzarini (L) & Tabasso (L), *Il restauro della pietra*, CEDAM, Milani 1985

Maledj (M), *Contribution à l'étude de la thérmomigration de l'eau dans les milieux poreux*, Edition Meudon, Paris 1968

Mamillan (M), *Pathologie et restauration des constructions en pierres*, DAPCO, Rome 1975

Roques (H), *Précis de cryptogamie*, librairie Maloine, Paris 2002

Rousset (B) & Bläuer (C), *Cathédrales de Bâle, de Berne, de Fribourg et de Lausanne projet de contrôle et de suivi des consolidations - résultats des tests de laboratoire*, Conservation Science Consulting Sarl, Fribourg 2009

Seaton (N) & al, *Characterization of porous solids, Studies in Surface Science and Catalysis*, Elsevier, London 2007

Torraca (G), *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles 2009

Torraca (G), *Matériaux de construction poreux*, Traduit par Di Matteo (C), ICCROM, Rome 1986

Torraca (G), *Solubilité et solvants utilisés pour la conservation des biens culturels*, Traduit par Demaret (V) & al, ICCROM 1981

Troin (J-F), *Maroc. Régions, pays, territoires*, Maisonneuve & Larose, Paris 2002

Vergès-Belmin (V) & al, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, ICOMOS, Ateliers 30, Paris 2008

Wheeler (G), *Alkoxysilanes and the consolidation of stone*, Getty Trust Publications Book Distribution center, Los Angeles 2005

Winkler (H), *La genèse des roches métamorphiques*, Traduit par Eller (J.P), Editions Ophrys, Paris 1996

رسائل جامعية:

بدرالدين بلعيبود، دراسة تحليلية لعملية ترميم تابوت "بلرفون" بالمتحف الوطني للآثار *FƺlǰŽi*، رسالة ماجستير، معهد الآثار 2008

Angeli (M), *Etude multiéchelle de la dégradation des roches par la cristallisation de sels dans les réseaux poreux*, Université de Cergy-Pontoise, Thèse de doctorat Soutenue en novembre 2007

Desarnaud (J), *Mécanisme de Croissance et de dissolution de cristaux de KCl sous Charge: Apport dans la connaissance des mécanismes d'altération des pierres par les sels*, Université Paul Cezanne, Thèse de doctorat soutenu en novembre 2006

Beck (K), *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, Thèse de doctorat en sciences des matériaux, université d'Orleans, Soutenue en octobre 2006

Bost (M), *Altération par le gel des massifs rocheux : Etude expérimentale et modélisation des mécanismes dégénération des contraintes dans les fissures*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées**,** Thèse de doctorat soutenue en février 2008

Ezzdine (R), *Endommagement des monuments historiques en maçonnerie*, spécialité : Mecanique, Université Bordeaux 1, Thèse de doctorat soutenue en 2007

Ozturk (I), *Alkoxysilanes consolidation of stone and earthen building materials*, a Thesis In The graduate Program in historic preservation Presented To The faculties of the university of Pennsylvania 1992

مقالات:

بدرالدين بلعيبود، « حماية سطح الحجارة الأثرية من الرطوبة»، مجلة آثار العدد 10 2013، ص 293-300

Barajas (M) & al, «*Effect of organic and inorganic consolidation agents on Tlaltecuhtli monolith*», in Journal of Archaeological Science 36 (2009) pp.2244–2252

Brunetti (A) & al, «*Visualization of monomer and polymer inside porous stones by using X-ray tomography*», in Physics Research B 222 (2004), pp.235–241

Cardiano (P) et al, «*Epoxy-silica polymers as restoration materials*», Polymer 44 (2003), pp.4435–4441

Carò (F) & Di Giulio (D), «*Influence of rock petrophysics on the performances of protective and consolidation treatments to natural building stones*», in Geophysical Research 77 (2005), pp.403-433

Casadio (F) & Toniolo (L), *«Polymer treatments for stone conservation: methods for evaluating penetration depth*», in JAIC 43 (2004), pp.03 -21

Ciardelli (F), «*New fluorinated acrylic polymers for improving weatherability of building stone materials*», in Progress in Organic Coatings 32 (1997), pp.43–50

Daniele (V) & Taglieri (G), *«Nanolime suspensions applied on natural lithotypes: The influence of concentration and residual water content on carbonatation process and on treatment effectiveness*», in Journal of Cultural Heritage 11 (2010), pp.102–106

D’arienzo (L) & al, *«New polymeric nanocomposites for improving the protective and consolidating efficiency of tuff stone»*, in Journal of Cultural Heritage 9 (2008), pp.253-260

Dei (L) & Salvador (B), «*Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay*», in Journal of Cultural Heritage 7 (2006), pp.110–115

Delgado Rodrigues (J), *«Tracing of decay profiles and evaluation of stone treatments by means of microdrilling techniques»*, in Journal of Cultural Heritage 3 (2002), pp.117–125

De Muynck (W) & al, «*Microbial carbonate precipitation in construction materials*», in Ecological Engineering 36 (2010), pp.118–136

Favaro (M) & al, *«Evaluation of polymers for conservation treatments of outdoor exposed stone monuments»*, in Polymer Degradation and Stability 91 (2006), pp.3083-3096

Ferreira Pinto (A.P) & Rodrigues (J), «*Stone consolidation: The role of treatment procedures*», in Journal of Cultural Heritage 9 (2008), pp.38-53

Grassi (S) & al, *«Nanocontainer aqueous systems for removing polymeric materials from marble surfaces: A new and promising tool in cultural heritage conservation»*, in Journal of Cultural Heritage 10 (2009), pp.347–355

Jimenez-Lopez (C) & al, *«Consolidation of quarry calcarenite by calcium carbonate precipitation induced by bacteria activated among the microbiota inhabiting the stone»*, in International Biodeterioration & Biodegradation 62 (2008), pp.352–363

Jroundi (F) & al, « *Stone-isolated carbonatogenic bacteria as inoculants in bioconsolidation treatments for historical limestone»,* in International Biodeterioration & Biodegradation 62 (2008), pp.352–363

Kapolos (J) & al, *«Evaluation of acrylic polymeric resin and small siloxane molecule for protecting cultural heritage monuments against sulfur dioxide corrosion»*, in Progress in Organic Coatings 59 (2007), pp.152–159

Karaca (Z), «*Water absorption and dehydration of natural stones versus time*», in Construction and Building Materials 24 (2010), pp.786–790

Karatasios (I) & al, «*Evaluation of consolidation treatments of marly limestones usedin archaeological monument»,* in Construction and Building Materials 23 (2009), pp.2803–2812

Kotlik (P), «*Impregnation under low pressure*», in Studies in Conservation 43 (1998), pp.42-48

Kumar (R) & Ginell (W), «*A new technique for determining the depth of penetration of consolidants into limestone using iodine vapor*», JAIC 36 (1997), pp.143-150

Kyung Kim (E) & al, *Effects of silica nanoparticle and GPTMS addition on TEOS-based stone consolidants»,* in Journal of Cultural Heritage 10 (2009), pp.214–221

Luigi (D) & Salvadori (B), «*Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay»,* in Journal of Cultural Heritage 7 (2006), pp.110–115

Pinto (F) & Rodrigues (D), «*Stone consolidation: The role of treatment procedures*», Journal of Cultural Heritage 9 (2008), pp.38-53

Podany (J) & al, «*Paraloid B-72 as a structural adhesive and as a barrier within structural adhesive bonds: evaluations of strength and reversibility*», in JAIC 40 (2001), pp.15-33

Mosquera (M) & al, «*Application of mercury porosimetry to the study of xerogels used as stone consolidants»,* in Journal of Non-Crystalline Solids 311 (2002), pp.185–194

Rodriguez-Navaro (C) & al, «*Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting*», in Chemosphere 68 (2007), pp.1929–1936

Silvia Vicini (S) & al, *«In situ copolymerisation of ethylmethacrylate and methylacrylate for the restoration of stone artefacts»,* in Journal of Cultural Heritage 2 (2001), pp.143-147

Tiano (P) & al, «*Biomediated reinforcement of weathered calcareous stones»,* in Journal of Cultural Heritage 7 (2006), pp.49–55

Zarraga (R) & al, «*Effect of the addition of hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane to TEOS-based stone consolidants*», in Journal of Cultural Heritage 11 (2010), pp.138–144

Zendri (E), «*Characterization and reactivity of silicatic consolidants»,* in Construction and Building Materials 21 (2007), pp.1098–1106

ملتقيات:

Arnold (A), « *Altération et conservation d'œuvres culturelles en matériaux poreux affectés par des sels* », colloaue sur le dessalement des matériaux poreux, 7éme journées d'étude de SFIIC, Poitiers, 9-10 mai 1996, imprimerie Darantiere, Paris 1996, pp.03-21

Bonora (R), « *L'utilisation des résines pour la conservation et la protection de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.245-254

Campbell (A) & al, «Calcium hydroxide nanoparticles for limestone conservation: Imbibition and adhesion », Symposium 2011 adhésifs et consolidants, Paris 2005

Caneva (G) & Salvadori (O), «*Altération biologique de la pierre* » la dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de LazzarinI (L) & Pieper (R), UNESCO, 1982, pp.143-180

Lewin (S.Z), « *Substances synthétiques pour la conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.225-234

Lewin (S.Z), « *The conservation of limestone objects and structures* », colloque sur l'altération des pierres : conférences, Bruxelles 1967, pp.41-51

Tobasso (L), « *Traitements de conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazzarini (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.211-224

Torraca (G), « *Philosophie générale de la conservation de la pierre* », La dégradation et la conservation de la pierre, textes des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, publié sous la direction de Lazarreni (L) & Pieper (R), UNESCO 1982, pp.187-210

دروس ومحاضرات:

Dubois (M), Processus géochimiques de surface, Cours UFR des Sciences de la Terre de l'Université de Lille, Avril 2002

القواميس:

يوسف محمد رضا، الكامل الكبير: قاموس اللغة الفرنسية، فرنسي-عربي، مكتبة لبنان ناشرون، ط.5، بيروت 2004

Haddad (E.W), *dictionnaire des termes techniques et scientifiques*, français -arabe, librairie de Liban publishers, Beyrouth 1998

Saadi (E), Lexique de géologie et de géomorphologie (français-arabe), Edit. SMER, Rabat 1990

الملاحـق

الملحق I: تحضير الشفرات الرقيقة:

الشفرات الرقيقة عبارة عن عينات من الصخور تحضّر من خلال عدة عمليات تهدف إلى الوصول الى سمك العينة الحجرية إلى حدود 30μ، وتهدف دراسة الشفرات الدقيقة بواسطة مجهر قاطب لتحديد التركيبة الفلزية للعينة المدروسة، ويمكن تقسيم عملية تحضير الشفرات الرقيقة إلى الخطوات التالية:

الخطوة الأولى:

بعد اختيار الحجارة التي يراد دراستها يتم تحضير عينات من خلال تقطيع الحجارة على شكل قطع سكر بواسطة آلة للتقطيع تمهيدا لإعداد الشفرات الرقيقة



الخطوة الثانية:

يكشط سطح القطعة الحجرية على صفيحة زجاجية للحصول على سطح أملس بواسطة مسحوق كاشط عبارة عن كاربير السيليسيوم (carbure de silicium) يستعمل في هذه العملية المسحوق بحبيبية متناقصة.

الخطوة الثالثة:

بعد عملية كشط العينة الحجرية والحصول على سطح أملس يلصق هذا الأخير بصفيحة زجاجية بواسطة رانتج إيبوكسي ويترك ليجف لعدة ساعات.





الخطوة الرابعة:

بعد جفاف الراتنج يتم مجددا تقطيع العينة الحجرية للحصول على أقل سمك ممكن قبل عملية التمليس النهائية، ويمكن استعمال قرص دوّار كاشط لتسهيل العملية وللحصول على سمك رفيع





الخطوة الخامسة:

تتم عملية تمليس الشفرة بشكل نهائي بإعادة عملية الكشط، ويتم في نفس الوقت مراقبة الشفرة بواسطة المجهر القاطب، يحث يجب الحصول السمك المطلوب من أجل إعطاء ألوان المميّزة للفلزات بالضوء القاطب.







الملحق II: بطاقة تقنية لمادة البارالويد ب72

البارالويد ب72 عبارة عن راتنج أكريليكي على شكل بلورات مكونة من 70% من ميثاكريلات الإيثيل و30% من ميثاكريلات الميثيل.

الخصائص:

يعتبر البارالويد ب72 راتنج حراري اللدونة ذو قساوة متوسطة، قليل التأثر بالضوء، تختلف مدة الحياة بحسب عوامل الوسط، يحتفض الراتنج بخصائصه لمدة تفوق 20 سنة

الذوبانية:

تذاب بلورات الراتنج في مذيبات عضوية كلأسيتون، التوليان، غيرقابلة للذوبان في مذيب "وايت سبيريت" (White Spirit)

درجة بداية اللدونة:

في حدود 70°C

درجة الذوبان:

حوالي 150°C

اللزوجة:

محلول 40 % في درجة حرارة 20 °C،

في الأسيتون حوالي 20 mPas

في التوليان حوالي 60 mPas

مجالات الاستعمال:

استعمل البارالويد ب72 في مجال صيانة المواد الأثرية منذ خمسينيات القرن الماضي، واستعمل كلاصق أو كمقوي أو كورنيش، عدة دراسات أثبتت أن البارالويد ب72 من أكثر الراتنجات المستقرة التي تستعمل في مجالات الصيانة، عادة ما تستعمل هذه المادة كمقوي للعديد من أنواع المواد الأثرية كالحجارة والفخار والخشب.

طرق الاستعمال:

ان الهدف من العلاج هو من يحدد طريقة تطبيق البارالويد ب72 من خلال اختيار التركيز الأمثل والمذيب المناسب سواء بالنسبة لعملية التقوية أو عملية اللصق، كما يستحسن استعمال أقل قدر من التركيز حتى لو استدعت الضرورة إعادة العملية لأن التركيز العالي يؤدي الى نتائج سلبية خاصة على السطح والطبيقات الخارجية للمادة. تطرح سرعة تبخر المذيب اشكالا حقيقيا، فعند استعمال مذيب بطيء التبخر هذا يؤدي الى تصلب الراتنج بشكل غير متجانس، بينما لا يكون التغلغل عميقا إذا كان المذيب سريع التبخر خاصة في عميات التقوية، ويكمن إضافة 0,1% من عامل التبلل للمساهمة في تغلغل المادة المقوية، ويستعمل البارالويد ب72 بالنسبة للعديد من المواد الأثرية أهمها:

الفخار والزجاج:

يستعمل البارالويد ب72 كلاصق بالنسبة للفخار والزجاج، تذاب بلورات الراتنج في الأسيتون أو الأسيتون/ كحول لتتم عملية التصلب سريعا، في البداية تعزل الكسور الموجة للصق بمحلول 10%، وبعدها تتم عملية اللصق ووصل الأجزاء بمحلول بتركيز 20- 40%.

الخشب:

بالنسبة لتقوية الخشب ينصح تطبق محلول من البارالويد ب72 بتركيز 5- 10 % في مذيب من التوليان، من أجل الحصول على تغلغل بطيء وعميق يمزج التوليان مع الغليسيرين وقد يطبق العلاج عدة مراة.

الرسومات:

يستعمل البارالويد ب72 كمثبت بالنسبة للرسومات بمختلف المواد الملونة وذلك بتطبيق محلول بتركيز 2-4% وينصح في هذه الحالات استعمال مذيب تولين/ايزوبروبانول

الملحق II: بطاقة تقنية لمادة اوروستاك أ.أس.س

اوروستاك أ.أس.س 2001 عبارة عن راتنج أكريليك-سيليكوني محلول في مذيب عضوي، يسوّق هذا المقوي على شكل محلول يطبق مباشرة على المادة المعالجة، يستعمل لتقوية المواد المسامية كالحجارة، الملاط، الفخار، الخشب، الجلود.

خصائص اوروستك أ.أس.س 2001:

يتميز راتنج اوروستاك أ.أس.س 2001 بلزوجة منخفضة 25 mPas في درجة حرارة 20 °C، كما يتميّز هذا الراتنج بارجاعية كبيرة وله خاصية التغلغل العميق في الشبكة المسامية للمادة، كما أن اوروستاك أ.أس.س 2001 غير معرض للاصفرار بسبب الأشعة ما فوق بنفسجة، كما يحسن هذا المقوي من الخصائص الميكانيكية للمادة، كما تتميّز هذه المادة المقوية بخاصية عزل الرطوبة ما يوفر للمادة حماية من الرطوبة.

طريقة الاستعمال:

يطبق اوروستاك أ.أس.س 2001 عبر الغمر أو بواسطة الفرشاة، ويمكن تطبيق المقوي في وسط مفرغ من الهواء.

الملحق II: بطاقة تقنية لمذيب الأسيتون

الأسيتون سائل شفاف قابل لاشتعال لديه رائحة مميزة، لديه قابلية كبيرة للذوبان في الماء والإيثانول، جزيئاته قطبية مشكلة من سلاسل كاربونية قصيرة، ينتمي الأسيتون كيميائيا لعائلة الكيتونات وتركيبته الكيميائية هي CH_3COCH_3

$$H_3C-C(=O)-CH_3$$

يستخدم الأسيتون في صناعة الراتنجات والألياف والأدوية وعدة مواد كيميائية أخرى، ويستعمل بشكل كبير كمذيب عضوي في العديد من المجالات، ففي المختبر يستخدم كمذيب قطبي غير بروتوني في مجموعة متنوعة من التفاعلات العضوية، أما في مجال صيانة المواد الأثرية فغالبا ما يستعمل كمادة للتنظيف وكمذيب لتحضير راتنجات خاصة منها حرارية اللدونة كالبارالويد ب 72.

خصائص الأسيتون:

- درجة حرارة الغليان: 53 م
- درجة الانصهار -95 م
- الكثافة النسبية: 0,819
- الكتلة المولية: 58 غ/مول
- اللزوجة: 0.32 cp في درجة حرارة 20 م

قائمة المصطلحات

قائمة المصطلحات:

A

Adsorbé...ممتزة

Acétates de polyvinyle..خلات البوليفينيل

Acide fluorhydrique..حمض الفليور هيدريك

Acide sulfurique...حمض كبريتيكي

Acide sulfureux..حمض كبريتي

Acide silicique...حمض السيلسيك

Acrylique...أكريليك

Acryloid B-72 ....أكريليويد ب-72

Angström..أنستروم

Alkoxysilane..ألكوكسي سيلان

Alkylpolysiloxanes...ألكيل بوليسيلوكسان

Aluminates de potassium.......................................ألومينات البوتاسيوم

Alumine...ألومين

Autotrophe...ذاتية التغذية

B

Bacillus cereus...عصيات سيروس

Barite...باريت

Boursouflure...انتفاخ نصف كروي أجوف

C

Calcination..كلسنة

CaLoSiL®...كالوسيل

Carbonates de baryum ....كربونات الباريوم

Caractéristiques de la maille......................................خصائص عقدية

Colloïdal...غروي

Copolymères acryliques..................................متعدد البوليمر الأكريليكي

Cyanobactérie...بكتيريا زرقاء

D

Dilatation hydrique...تمدد مائي

Durcisseur...مصلّب

E

Epitaxie...إبيتاكسي

Epoxydes...ايبوكسيد

Ethanol..إيثانول

F

Fluorescent...وهّاجة

Fluorone...فليورون

Fluosilicates..فليوسيليكات

G

Glycérine...غليسيرين

H

Hétérotrophe...متعددة التغذية

Hydratation...تميّه

Hydrofuge ....عازلة للرطوبة

Hydrolyse..حلمأة

Hydroxyle...هيدروكسيل

Hydroxyde de barium...هيدروكسيد الباريوم

Hydroxyde de Calcium..هيدروكسيد الكلسيوم

Hygroscorique... مستطربة

I

Isopropanol...إيزوبروبانول

K

Kaolin..كاولين

M

Méthacrylate de méthyle...ميتاكريلات الميثيل

Microperçage...ثقب دقيق

Monomère...مونومير

Mycobactérie...ميكوبكتيريا

N

N-propanol...ن- بروبانول

L

Liaisons intermoléculaires...روابط بين جزئية

O

Orthosilicate de tétraéthyle..........................أورثوسيليكات لإيثيل الرباعي

P

Paraloïd B-72..باراالوييد ب-72

Phototrophe..ضوئية التغذية

Polymères...بوليمير

Polyméthacrylate de méthyle...........................متعدد ميثاكريلات الميثيل

Polysiloxanes...بوليسيلوكسان

Pseudomonas..بكتيريا زائفة

R

Résines synthétiques...راتنجات إصطناعية

Restaration Artisanale ....ترميم حرفي

Restaration scientifique ....ترميم علمي

Réversibilité...إرجاعية

Rhodamine B..رودامين ب

Rupture…………..………………..………………………….إنقطاع

S

Silane...سيلان

Silicates d'éthyle...سيليكات الإيثيل

Silice hydratée..سيليس مميّه

Silicone...سيليكون

Silicopropionale...سيليكوبروبيونال

Solvatation...تذويب

Solvant aprotique ....مذيب غير بروتوني

Solvant protique..مذيب بروتوني

Sous-consolidation ....تقوية ضعيفة

Stucage..تمليط

Sulfates de baryum..كبريتات الباريوم

Sur-consolidation ....تقوية مضاعفة

T

Tétrachlorure de Sodium................................رباعي كلورير الصوديوم

Tétraéthoxysilane..رباعي إثوكسي سيلان

Thermodurcissable...حرارية الصلابة

Thermoplastique...حرارية اللدونة

Triéthanolamine...إيثانولامين الثلاثي

Triméthoxyméthylsilane.............................ثلاثي ميثوكسي ميثيل السيلان

U

Urée...يوريا

V

Volatile…………………………………………………………طيّارة

فهرس الصور

فهرس الصور:

الصورة رقم 01: صورة مكبرة لشقوق دقيقة على سطح حجارة كلسية...............19

الصورة رقم 02: صورة مجهرية (MEB) لشق دقيق لعينة من الطابشير نتيجة تبلور الأملاح في المسامات..19

الصورة رقم 03: انفصال طبقة دقيقة على شكل انتفاخ نصف كروي لحجارة رملية...20

الصورة رقم 04: انفصال طبقة دقيقة على شكل انتفاخ نصف كروي لتمثال من الحجارة الكلسية...21

الصورة رقم 05: انفصال لطبقة رقيقة على سطح حجارة كلسية 22

الصورة رقم 06: صورة مجهرية لمقطع عرضي لعينة من سطح حجارة كلسية متلفة

تمثل شقوق متوازية مسئولة عن ظاهرة الانفصال الطبقي..............................22

الصورة رقم 07: تفتت حبيبي لحجارة رملية..23

الصورة رقم 08: صورة مجهرية (MEB) لعينة من الحجارة الرملية قبل وبعد ظاهرة التفتت الحبيبي...24

الصورة رقم 09: صور مكبرة تمثل مراحل التفتت الحبيبي لحجارة رملية.........24

الصورة رقم 10: شفرة رقيقة معرضّة لإضاءة وهّاجة العينة من رخام تعرض لتفتت تبين تفكّك بلورات الكالسيت...25

الصورة رقم 11: ضياع تفاصيل على نحت بارز بسبب ذوبان سطح الحجارة كلسية...26

الصورة رقم 12: ثقوب على سطح حجارة كلسية بفعل الأشنات........................27

الصورة رقم 13: صورة مكبرة لثقوب دقيقة على سطح حجارة كلسية 28

الصورة رقم 14: صورة مجهرية (MEB) تبين حدوث شقوق بين المسامات بفعل تبلور الأملاح..32

الصورة رقم 15: صورة مجهرية (MEB) تبين بلورات (NaCl) وبلورات ($MgSO_4.6H_2$) ما بين بلورات الكواتز لعينة من حجارة رملية بها تفتت حبيبي......33

الصورة رقم 16: نتائج اختبارات تبين درجة تأثير الأملاح على عينات حجرية بعد عدة دورات غمر في المحلول المالح/ تجفيف...35

الصورة رقم 17: صورة مجهرية (MEB) تبين ترسب كبريتات الصوديوم بين بلورات الكالسيت...37

الصورة رقم 18: صورة صور مجهرية لعدة أشكال من بلورات الجليد..............38

الصورة رقم 19: صورة مجهرية (MEB) لعينة حجرية تبين حدوث شقوق دقيقة في بفعل الجليد...39

الصورة رقم 20: صورة مجهرية (MEB) لعينة من الحجارة تبين قشور دقيقة ناتجة عن ظاهرة التجلد...39

الصورة رقم 21: صورة مجهرية (MEB) تبين انفصام في لبلورات الكالسيت نتيجة التمدد الحراري غير المتجانس...45

الصورة رقم 22: صورة حرارية تبين اختلاف في انتشار الحرارة بين طبقات العينة من حجرية الرملية بعد تعريضها للحرارة..46

الصورة رقم 23: صورة مجهرية (MEB) لعينة من الحجارة الرملية تبين تغلغل جذيرات الأشنة بين حبات الكوارتز..58

الصورة رقم 24: صورة مجهرية لفطر (*Aspergillus niger*)..........................60

الصورة رقم 25: صورة مجهرية (MEB) لعينة من الحجارة الرملية تظهر تغلغل الفطريات بين حبات الكواتز...61

الصورة رقم 26: صورة مجهرية لمقطع طولي أشنة وريقية (*Parmelia sulcata*) تبرز الجذيرات التي تتغلغل في الحجارة..62

الصورة رقم 27: صورة مجهرية لبكتيريا الكبريت.......................................63

الصورة رقم 28: صورة مجهرية (MEB) تبين جسور من المادة المقوية تربط عناصر الحجارة المعالجة...69

الصورة رقم 29: عملية حقن المادة المقوية في رخام اصيب بتفتت حبيبي............75

الصورة رقم 30: تطبيق المادة المقوية عن طريق التشبع (à refus).....................77

الصورة رقم 31: تطبيق مقوي في وسط مفرغ من الهواء...............................78

الصورة رقم 32: تشكل طبقة على بلورة الكالسيت بفعل ظاهرة ابيتاكسي (Epitaxie)..82

الصورة رقم 33، 34: صور مجهر الكتروني (MEB) لحجارة عينة معالجة بالنانو هيدروكسيد الكربون...84

الصورة رقم 35: صور مجهر الكتروني (MEB) لعينة من الحجارة معالجة مادة كالوسيل (CaLoSiL®)...85

الصورة رقم 36: صور مجهر الكتروني (MEB) لعينات حجرية معالجة ببكتيريا منتجة لكربونات الكلسيوم...87

الصورة رقم 37: إنفصال طبقة رقيقة لحجارة كلسية بسبب تغلغل سيىء لبارلويد ب72...107

الصورة رقم 38: صورة مجهرية (MEB) لشفرة تبين مدى تعقيد الوسط المسامي...109

الصورة رقم 39: سطح حجارة رملية غير قابل للتبلل بعد تطبيق سيليكات الإيثيل...115

الصورة رقم 40: تطبيق إختبار مقاومة الثقب الحجارة باستعمال جهاز مثقاب دقيق...117

الصورة رقم 41: صورة مقطعية باستعمال الأشعة السينية لعينة معالجة بـ (TEOS)...119

الصورة رقم 42: صورة بواسطة قمر اصطناعي لمدينة الرباط مع تحديد موقع شالة الأثري 124

الصورة رقم 43، 44: مناظر عام لموقع شالة الأثري..................................127

الصورة رقم 45: جانب من المقبرة الملكية المرينية لموقع شالة......................128

الصورة رقم 46: صورة جوية لموقع شالة الأثري....................................128

الصورة رقم 47،48: ظاهرة التفتت الحبيبي للحجارة الرملية لموقع شالة...........132

الصورة رقم 49، 50: ظاهرة التفتت الحبيبي للحجارة الرملية لموقع شالة..........133

الصورة رقم 51، 52: أشنات على سطح الحجارة الرملية لموقع شالة..............134

الصورة رقم 53: موضع أخذ العينات الحجرية من موقع شالة........................135

الصورة رقم 54: عينات الحجارة الرملية المحضّرة...................................136

الصورة رقم 55: آلة تقطيع الحجارة وتحضير العينات الحجرية.....................136

الصورة رقم 56: صورة مجهرية قواقع كلسية مجهرية المنخربات.................138

الصورة رقم 57: صورة مجهرية قواقع كلسية مجهرية الشعاعيات..................138

الصورة رقم 58: المجهر القاطب المستعمل في الدراسة البيتروغرافية للعينات..140

الصورة رقم 59، 60، 61: صور مجهرية بالمجهر القاطب لشفرات رقيقة للعينات..141

الصورة رقم 62: بلورات البارالويد ب 72 143

الصورة رقم 63، 64: طريقة إذابة بلورات البارلويد ب72 في مذيب الأسيتون..144

الصورة رقم 65: صورة تبين صعود فقاعات هوائية اثر تطبيق المادة المقوية.....146

الصورة رقم 66: صورة تبين غمر عينتين في مادة البارالويد ب 72..146

الصورة رقم 67: صورة تبين تغير لون العينات المعالجة بالمادتين المقويتين......147

الصورة رقم 68: إختبار قابلية التبلل بالنسبة للعينة الشاهدة T.......................148

الصورة رقم 69: إختبار قابلية التبلل بالنسبة للعينة P..................................149

الصورة رقم 70، 71: إختبار قابلية التبلل بالنسبة للعينة P............................150

الصورة رقم 72: مقارنة قابلية التبلل بالنسبة للعينات الثلاث.........................151

الصورة رقم 73، 74: إختبار النفاذية للعينات الثلاث (بعد 5 د)....................152

الصورة رقم 75، 76: إختبار النفاذية للعينات الثلاث (بعد 30 د)...................153

الصورة رقم 77، 78: إختبار النفاذية للعينات الثلاث (بعد 45 د)...................154

فهرس الأشكال

فهرس الأشكال:

الشكل رقم01: مراحل التلف الحجارة بفعل تبلور الأملاح وفقدان تماسك............31

الشكل رقم 02: شكل توضيحي يبين مختلف مراحل امتلاء المسامات بالرطوبة.....41

الشكل رقم 03: رسم توضيحى يبين اتجاهي تمدّد بلورة الكالسيت......................44

الشكل رقم 04: منحنى غولدشميت (Goldschmidt).....................................48

الشكل رقم 05: رسم توضيحي لعملية التقوية بواسطة الحقن...........................75

الشكل رقم 06: تطبيق مقوي بواسطة فرش...76

الشكل رقم 08: تمثيل لبوليمرات مرتبط فيما بينها نتيجة الجذب الكهربائي بين الجزيئات ثنائية القطب..80

الشكل رقم 09: تمثيل للتركيبة الكيميائية الأساسية للسيلان...............................94

الشكل رقم 10: تمثيل الإرتباط الكيميائي لحمض السيليس $Si(OH)_4$.................95

الشكل رقم 11: شكل توضيحي للآلية الكيميائية لالتحام المواد السيلانية بالحجارة...95

الشكل رقم12: صيغ كيميائية لأهم المقويات السيلانية...................................98

الشكل رقم 13: رسم تمثيلي لجزيء رباعي إثوكسي سيلان $Si(C_2OH_5)$............. 99

الشكل رقم 14: رسم توضيحي لكيفية تغلغل المادة المقوية.............................106

الشكل رقم 15: رسم توضيحي يبين إرتباط المسامية بتجانس العناصر المشكلة للحجارة..110

الشكل رقم 16: رسم توضيحي يبين أنواع الجيوب في الشبكة المسامية............111

الشكل رقم 17: منحنى بياني سجل مقاومة الحجارة لقوة الثقب.......................117

الشكل رقم 18: منحنى للمعدلات الشهرية للرطوبة النسبية لمدينة الرباط لسنة 2013..122

الشكل رقم 19: منحنى يمثل درجات الحرارة الشهرية القصوى والدنيا لمدينة الرباط لسنة 2013..123

الشكل رقم 20: شكل يمثل الصيغة الكيميائية لراتنج بارالويد ب 72................143

فهرس الجداول

فهرس الجداول:

الجدول رقم 01: أنواع الأملاح المسببة في تلف الحجارة الأثرية وأهم مصادرها...30

الجدول رقم 02: جدول يبين ذوبانية والرطوبة النسبية للتوازن لبعض الأملاح......34

الجدول رقم 03: جدول يبين معامل التمدد الحراري الافقي المتوسط بالنسبة للحجارة الكلسية حسب اتجاه الترسيب بالنسبة للحجارة الرسوبية...................................46

الجدول رقم 04: قيم ذوبانية بعض الفلزات المكونة للصخور...........................51

الجدول رقم 05: جدول لأهم الفطريات التي تتكاثر على الحجارة......................59

الجدول رقم 06: جدول لأهم البكتيريا التي تتكاثر على الحجارة........................64

الجدول رقم 07: أهم الجذور العضوية المشكلة للمقويات السيلانية...................100

الجدول رقم 08: معدل الرطوبة النسبية لمنطقة الرباط لسنة 2013...............122

الجدول رقم 09: معدل درجات الحرارة لمنطقة الرباط لسنة 2013................123

الجدول رقم 10: معايير فعالية عملية التقوية بالنسبة للعينات الثلاث................155

الفهرس العام

الفهرس العام:

قائمة المختصرات

المقدمة

الفصل الأول: فقدان تماسك الحجارة الأثرية

I- مظاهر فقدان تماسك الحجارة الأثرية

I-1 الشقوق

I-2 ظاهرة الانفصال

I-2-1 الانتفاخ

I-2-2 الانفصال المتوازي

I-3 التفتت

I-4 الذوبان

I-5 الحت

I-6 الثقوب الدقيقة

II- آليات فقدان تماسك الحجارة

II-1 الآلية الفيزيائية

II-1-1 الأملاح القابلة للذوبان

أ ـ مصدر الأملاح

ب ـ آلية التلف

II-1-2 تجمد الماء

أ ـ نسبة تشبع المسامات بالماء

ب- درجة الحرارة

ج- طبيعة الماء داخل المسامات

II-1-3 التغيرات في درجة الحرارة

II-2 آلية التلف الكيميائية

II-2-1 تفاعلات الكيميائية المسببة للتلف

ب- الذوبان

ب- التميه

ج- أكسدة/إرجاع

د- الحلمأة

II-2-2 العوامل المحددة للتلف الكيميائي

أ - تأثير الماء

ب - تأثير الغازات

II-3 آلية التلف الفيزيوكيميائية

II-3-1 العوامل المحددة للتلف البيولوجي

أ- الضوء

ب- العناصر المغذية

ج- المناخ

د- التلوث

II-3-2 آليات التلف البيولوجي

II-3-3 الكائنات الحية المسببة في التلف البيولوجي

أ- الفطريات

ب- الطحالب

ج- الأشنات

د- البكتيريا

الفصل الثاني: تقوية الحجارة الأثرية

I - تعريف عملية التقوية

II- تاريخ أعمال التقوية

III- طرق ومناهج تطبيق المواد المقوية

IV- أنواع المقويات

1-IV المقويات غير العضوية

1-1-IV هيدروكسيد الكالسيوم

2-1-IV هيدروكسيد الباريوم

2-IV المقويات العضوية

3-IV مواد مشكلة من السيليسيوم

V- فعالية عملية التقوية

1-V عقبات عملية التقوية

V- 1-1 عمق التغلغل

V- 1-2 تغير لون الحجارة

V- 2 تقييم العلاج

V- 2-1 الخصائص البيتروفيزيائية

4-2-V التحليل العنصري الكيميائي

5-2-V التفاعل مع الحمض

6-2-V بخار اليود

7-2-V الملوّنات

8-2-V قابلية التبلل

V-2-9 قياس المقاومة المادة للثقب الدقيق

V -2-10 تقنية الرنين المغناطيسي النووي (RMN)

V-2-11 التصوير المقطعي بالاستعمال الأشعة السينية

الفصل الثالث: تقييم فعالية مادتي التقوية (البارالويد ب72 وأوروستك أس أس 2001) على عينات من الحجارة الرملية

I- نبذة تاريخية حول موقع شالة بالرباط

II- تشخيص حالة الحفظ حجارة الموقع

III- إختبارات تطبيق المواد المقوية:

III-1 تحضير العينات

III-2 وصف بيتروغرافي

III-3 تطبيق المادة المقوية

III-3-1 بارالويد ب 72

III-3-2 أوروستاك أ س أس

III-4 نتائج الإختبارات

III-4-1 التغير في اللون

III-4-2 قابلية التبلل

III-4-3 النفاذية

IV- تحليل نتائج الاختبارات

الخاتمة

قائمة المراجع

قائمة المصطلحات

فهرس الصور

فهرس الأشكال

فهرس الجداول

الفهرس العام